[costanti]

anno 20 numero **38** / 04.25

asimmetrie
rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

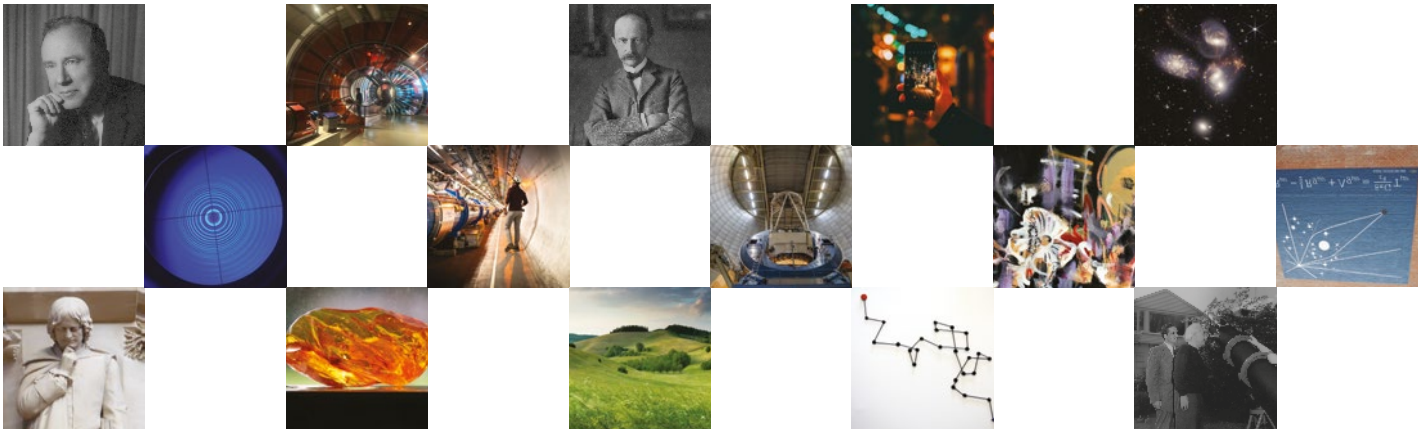
asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

Le costanti fisiche, di cui ci occupiamo in questo numero, sono quantità in generale non predette ma misurate, che costituiscono il punto di contatto tra la teoria e la realtà fisica determinata degli esperimenti. In alcuni casi, i loro valori costituiscono lo spartiacque tra descrizioni anche molto diverse dei sistemi fisici. Ad esempio, due grandi rivoluzioni concettuali della fisica del XX secolo – la teoria della relatività ristretta e la meccanica quantistica – sono intimamente associate a due di queste costanti: la velocità della luce *c* e la costante di Planck *h*. Un altro esempio di cui ci occuperemo è la costante di Boltzmann, che gioca invece il ruolo di *trait d'union* tra due descrizioni egualmente valide dei sistemi termodinamici: la descrizione macroscopica classica e quella microscopica basata sulla meccanica statistica. Le teorie delle quattro interazioni fondamentali – il modello standard per le interazioni forti ed elettrodeboli e la teoria della relatività generale per l'interazione gravitazionale – contengono, tra le altre, le costanti di accoppiamento, che determinano le intensità delle interazioni. In particolare, la costante di gravitazione universale, che compare nelle equazioni di Einstein, è completamente trascurabile alle scale di energia delle particelle elementari: una vera fortuna visto che non sapremmo trattare la gravità a livello quantistico! Parlando di effetti quantistici, vedremo che le costanti del modello standard non sono veramente costanti ma variano con l'energia. A proposito di costanti che variano, siamo sicuri che le costanti siano le stesse sempre e ovunque? Oppure possono essere diverse in diverse regioni dello spaziotempo, come suggerito da alcuni modelli cosmologici? Parlando di cosmologia: il motore dell'espansione accelerata dell'universo è la costante cosmologica o qualcos'altro? In generale, cosa possiamo imparare dai valori delle costanti? La fisica e la cosmologia sono stabili rispetto a variazioni di questi valori? Quanto devono essere correlati i valori delle costanti per riprodurre la fisica osservata? Concetti complessi come la naturalezza, il *fine tuning*, il principio antropico sono utili o fuorvianti? Sono tante le questioni aperte che proviamo a raccontarvi.

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
presidente INFN



asimmetrie
Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da INFN.

Semestrale, anno 20,
numero 38, aprile 2025

direttore editoriale
Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile
Catia Peduto

direttore comitato scientifico
Nicolao Fornengo

comitato scientifico
Daniele Del Re
Viviana Fafone
Giuliana Galati
Sandra Leone
Alessandro Papa

redazione
Catia Peduto

hanno collaborato
Angelo Bassi, Giovanni Battimelli, Cecilia Collà Ruvolo, Stefano Camera, Marco Ciuchini, Giulia Formica, Irene Giardina, Anna Greco, Sandra Lucente, Francesca Mazzotta, Paolo Pani, Stefano Marcellini, Alessandra Silvestri, Pietro Reviglio

contatti redazione
INFN Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione
Hylab

stampa
Tipografare srl

FSC MISTO Carta FSC® C174666

su carta certificata FSC
carta interno:

R4 Next Bulky da 130 gr/m^2
carta copertina:
garda matt art da 300 gr/m^2

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'INFN, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di aprile 2025.
Tiratura 18.000 copie.

come abbonarsi
L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare la redazione all'indirizzo comunicazione@presid.infn.it

sito internet
Asimmetrie 38 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche online su www.asimmetrie.it

e-magazine
Asimmetrie è anche disponibile in versione digitale, ricca di ulteriori contenuti multimediali, come app di iOS e Android sull'Apple Store e nel Google Play Store.

crediti iconografici
Foto copertina Andreas Brockel / Getty Images //foto p. 4 © Gareth McCormack / Alamy Foto Stock ; figg. a, b, c, 1 p. 5-8 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto d p. 9 © CERN; foto e p. 10 © Claudio Testa / Unsplash // fig. a p. 11 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto 1 p. 12 © Trinity College Library, Cambridge University, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto b p. 13 S. Marcewllini-INFN // fig. a p. 14 Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto b p. 15 © AIP Emilio Segrè Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates Collection; foto c p. 16 © Dan Silva / Unsplash // foto a p. 17 © World History Archive / Alamy Stock Photo; foto b p. 18 © INFN // foto a p. 19 © R. Zingonifig. b p. 20 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 21 © Estate of Francis Bello/Science Photo Library // foto a p. 22 © © switas / iStock; foto b p. 23 © Caltech; foto c p. 24 © AIP Emilio Segrè Visual Archives, E. Scott Barr Collection; foto d p. 25 Computational Physics Inc.// foto a p. 26 © Blackstone-Shelburne, New York, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Wheeler Collection; foto b p. 27 © Advanced Study Shelby White and Leon Levy Archives Center; fig. c p. 28 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a p. 29 © NASA, ESA, CSA, STScI, James Webb Telescope; foto b p. 30 © Leiden Muurformules project, courtesy of Prof. Sense Jan van der Molen and Prof. Ivo van Vulpen from Leiden Universiteit; foto c p. 31 sinistra: © AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection, destra: © Smithsonian Institution Archives; foto d p. 32 © The Regents of the University of California, Lawrence Berkeley National Laboratory // foto a p. 33 © (©AIP Emilio Segrè Visual Archives, Lande Collection; foto b p. 34 © AIP Emilio Segrè Visual Archives, Segrè Collection; foto c p. 35 ©Hieke/Wikimedia // foto a p. 36 © N. Fornengo- INFN; fig. b p. 37 © Just_Super / iStock // foto a, b pp. 38-39 © INRIM // foto a p. 40 © Quinn Dombrowski/Flickr // foto a p. 42 © Jordi Villar / Shutterstock; fig. b p. 43 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a, b pp. 44-45 © P. Reviglio // foto p. 46 ©N. Palmeri.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti dalla nostra volontà, avessimo omesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

38 / 04.25
[costanti]

***h* e suoi fratelli** 4
di Marco Ciuchini

Speed limit 11
di Stefano Marcellini

Quanto basta per evitare una catastrofe 14
di Angelo Bassi

Attrazione fatale 17
di Paolo Pani

La rivincita del disordine 19
di Irene Giardina

La carica e suoi derivati 22
di Nicolao Fornengo e Alessandro Papa

L'errore geniale 26
di Stefano Camera

Andante, ma non troppo 29
di Alessandra Silvestri

[as] radici 33
Tra meccanica e termodinamica
di Giovanni Battimelli

[as] visioni 36
Avogadraffollato
di Giuliana Galati

[as] riflessi 38
Le costanti e la metrologia contemporanea
di Giulia Formica

[as] intersezioni 40
Segni sognanti
di Sandra Lucente

[as] illuminazioni 42
Misurare la costante di Planck con i LED
di Anna Greco

[as] convergenze 44
Il Mistero del Fiore Primordiale
di Pietro Reviglio

[as] spazi 46
Science Gateway
di Cecilia Collà Ruvolo

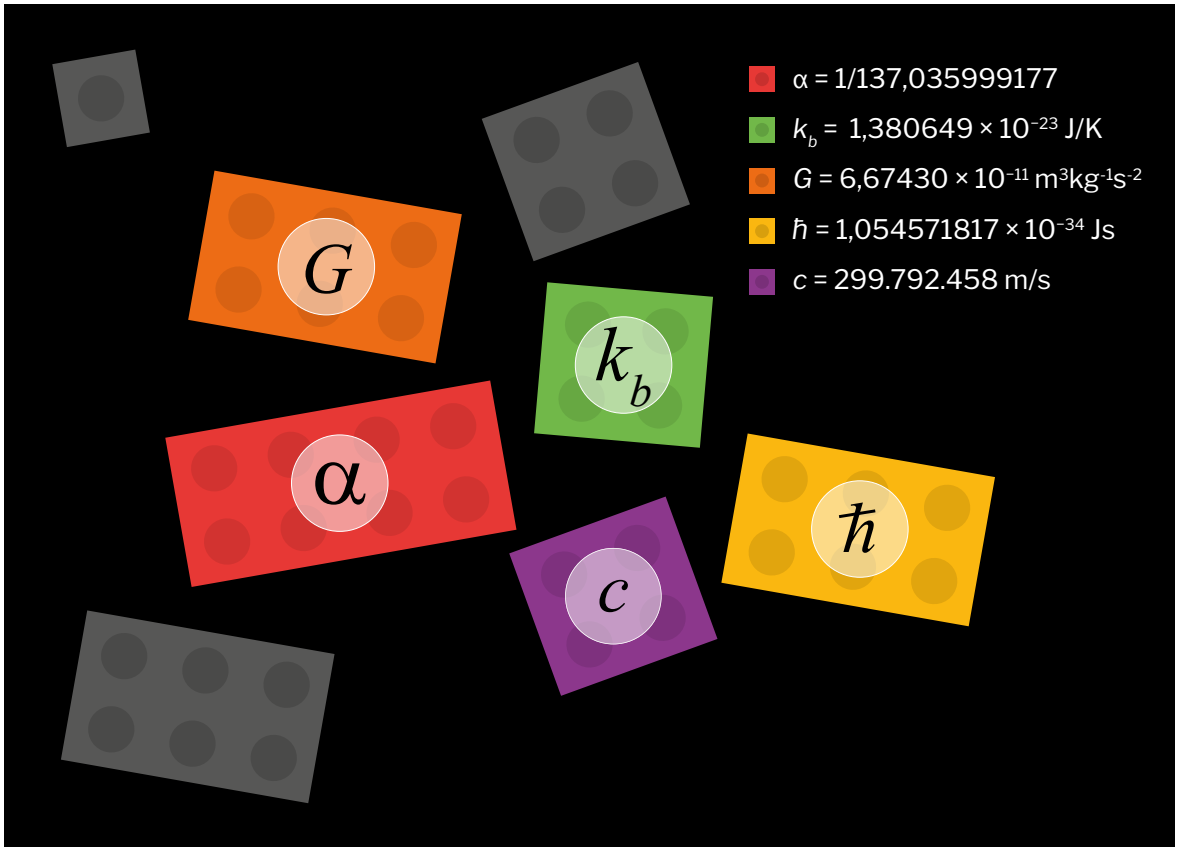
[as] traiettorie 47
Insegnare a meravigliarsi
di Francesca Mazzotta

[as] lampi 48

h e suoi fratelli

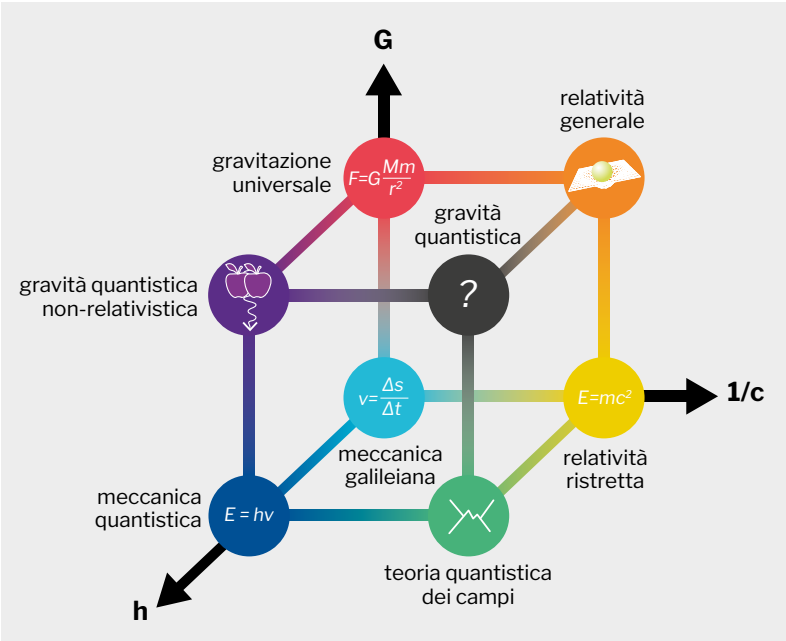
Le costanti fondamentali

di Marco Ciuchini



Le leggi che governano i fenomeni fisici esprimono relazioni matematiche tra quantità "variabili". Si pensi, ad esempio, alla legge di gravitazione universale, in cui la forza tra due corpi "varia" con la loro distanza. Tuttavia, esse contengono anche quantità il cui valore non dipende dallo spazio e dal tempo né dal particolare processo utilizzato per misurarlo. Si tratta delle "costanti universali", che entrano nel calcolo dei processi osservabili: sono quantità che si incontrano nella descrizione teorica dei processi fisici, i cui valori non sono spiegati dalla teoria e possono essere determinati solo sperimentalmente attraverso una misura. Una lista completa delle costanti fisiche note ne includerebbe alcune decine, ma qui ci occupiamo delle costanti fisiche "fondamentali", che definiamo come quelle costanti che compaiono nelle teorie che descrivono le interazioni fondamentali (elettromagnetica, debole, forte e gravitazionale). Naturalmente la nozione di "fondamentale" riferita a una costante fisica dipende dal quadro teorico di riferimento ed è quindi soggetta a evoluzione. La velocità della luce nel vuoto non era considerata né costante né fondamentale prima della teoria della relatività ristretta del 1905, mentre oggi è alla base della nostra comprensione delle proprietà dello spaziotempo e compare in tutte le teorie fondamentali. In effetti, le costanti possono essere considerate il punto di contatto tra la costruzione teorica, che definisce le relazioni tra gli oggetti matematici utilizzati per descrivere i processi, e la realtà fisica che determina, attraverso la misura, i valori delle costanti. Da questo punto di vista, una teoria è tanto più fondamentale quanto più è in grado di descrivere correttamente la fisica in termini del minor numero possibile di costanti. Teniamo quindi a mente che quelle che consideriamo oggi costanti fondamentali potrebbero non esserlo più domani! E che non è del tutto scontato che ciò che oggi riteniamo una costante, potrebbe in realtà dipendere (molto lentamente) dal tempo (vd. p. 29, ndr).
Ma di quali costanti stiamo parlando? Abbiamo già ricordato la velocità della luce nel vuoto *c*, introdotta con la teoria della relatività ristretta. Analogamente, le altre grandi teorie del '900 contengono nuove costanti fondamentali. La meccanica quantistica introduce la costante di Planck (*h*), detta anche

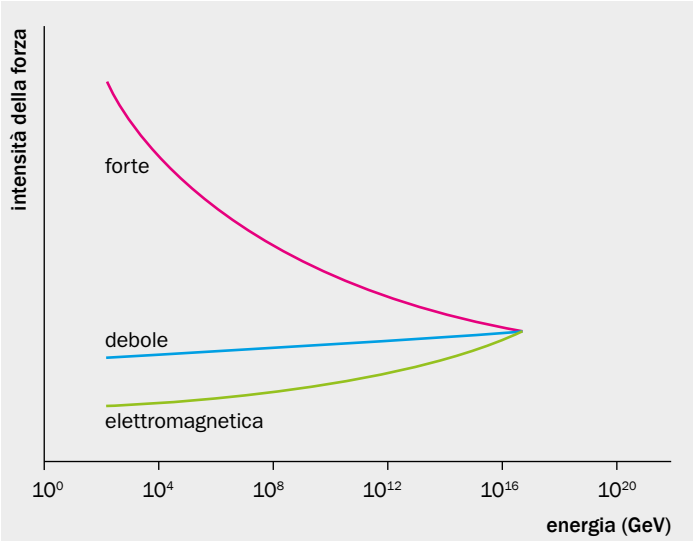
a.
Le costanti fondamentali trattate in questo numero, insieme agli altri parametri del modello standard, contribuiscono a "costruire" le predizioni teoriche da confrontare con le misure sperimentali.



b.
Il cubo delle teorie: ad ogni vertice del cubo è associata la teoria che corrisponde al valore delle costanti fondamentali indicate dagli assi.

"quanto d'azione" (avendo le dimensioni di un'energia per un tempo), che compare nella quantizzazione delle grandezze fisiche (energia, momento angolare, ecc.), ma anche nell'enunciato del principio di indeterminazione di Heisenberg.
La teoria della relatività generale fa uso sia di c che della costante di gravitazione universale G, introdotta da Newton due secoli prima, ma introduce anche una nuova costante, la costante cosmologica Λ, che ha un ruolo fondamentale nella nostra attuale comprensione della cosmologia riassunta nel modello standard cosmologico (vd. pp. 11-17, ndr).
I fisici russi Matvej Petrovič Bronštejn, Efim Isaakovič Zelmanov e Lev Borisovič Okun hanno introdotto il "cubo delle teorie", costruito in uno spazio che ha sugli assi (x, y, z) proprio le tre costanti $\hbar$ (ovvero la costante di Planck "ridotta" che si legge "h tagliato" e che non è altro che $h/2\pi$), $1/c$ e G. Il cubo ci dà una rappresentazione grafica delle teorie che descrivono la fisica in diversi regimi: a ogni vertice è associata la teoria che corrisponde al valore delle costanti fondamentali indicate dagli assi. Così, ad esempio, il vertice del cubo nell'origine $\hbar = 0$, $1/c = 0$, $G = 0$ corrisponde alla meccanica galileiana (notate che $1/c = 0$ implica che la velocità della luce nel vuoto viene considerata infinita), i vertici che si trovano sugli assi, in cui una sola costante fondamentale è diversa da zero, corrispondono alle diverse teorie che le hanno introdotte: la meccanica quantistica ($\hbar$ diverso da zero), la relatività ristretta ($1/c$ diverso da zero) e la teoria newtoniana della gravità (G diverso da zero). I vertici che si trovano nei piani definiti da due assi, ovvero con due costanti diverse da zero, corrispondono alla teoria della relatività generale, che è una teoria classica ($\hbar = 0$), alla teoria quantistica dei campi, classe a cui appartiene il modello standard delle particelle elementari, che non include la gravità ($G = 0$), e a una teoria di gravità quantistica non-relativistica ($1/c = 0$), che ad oggi non è ancora stata compiutamente formulata. Infine, la gravità quantistica, o "teoria del tutto", corrisponde al vertice con tutte le costanti diverse da zero.
Un'altra osservazione interessante riguardo alle costanti fondamentali discusse fin qui è che sono quantità dimensionali, non numeri puri come accade invece per altre di cui parleremo più avanti. Questo significa da una parte che il loro valore numerico dipende dalle unità di misura utilizzate (ad esempio, la velocità della luce c = 299.792.458 m/s), dall'altra che è possibile scegliere sistemi di unità di misura nei quali il valore di alcune costanti è posto per definizione uguale a 1. Oppure, in altre parole, si utilizzano le costanti stesse, definite a un valore di riferimento senza errore, come unità di misura per le loro dimensioni: ad esempio, si misurano le velocità in unità di c e dunque in tali unità 1 m/s è pari a 1/299.792.458 volte la velocità della luce. Sistemi di unità di misura di questo tipo vengono detti "naturali", perché fanno riferimento solo alle costanti fisiche fondamentali. Il più noto tra questi è il sistema di unità di misura di Planck che pone uguali a 1 proprio le costanti $\hbar$, c, G (per carica elettrica e temperatura si pongono uguali a 1 anche le costanti di Coulomb $1/4\pi\varepsilon_0$ e di Boltzmann k_B (vd. p. 19, ndr)). Per inciso, dal 2019 anche il

Sistema Internazionale di unità di misura, pur non essendo un sistema naturale, definisce le unità di misura (secondo, metro, chilogrammo, ecc.) a partire dai valori di riferimento di un insieme di costanti fisiche, tra cui anche c, $\hbar$, k_B.
Altre costanti fisiche fondamentali di grande interesse sono associate al modello standard, nel quale compaiono ad esempio le costanti d'accoppiamento delle tre interazioni fondamentali, che possono essere espresse in termini della costante di struttura fine α per le interazioni elettromagnetiche (ovvero come una combinazione della carica dell'elettrone con le costanti universali h, c e ε_0) e delle analoghe costanti α_s e α_W rispettivamente per le interazioni forti e deboli (vd. p. 22, ndr): sono le tre costanti adimensionali che determinano l'intensità delle interazioni fondamentali descritte dal modello standard e non sono predette dalla teoria, ma devono essere misurate. In realtà, considerando il modello standard una teoria fondamentale, tutti i suoi 19 parametri, che includono le masse delle particelle fermioniche e la massa del bosone di Higgs, possono essere considerati costanti fondamentali, con l'avvertimento che non sono veramente costanti! I loro valori cambiano infatti con l'energia dei processi fisici studiati a causa degli effetti quantistici (lo scambio delle cosiddette particelle virtuali). Tuttavia, questa dipendenza dall'energia, chiamata "*running*", è calcolabile nell'ambito della teoria e dunque, come per le teorie classiche, una singola misura fatta a una definita energia è sufficiente a determinare il valore di ciascuna costante a tutte le altre energie.
Abbiamo detto che le costanti fisiche non sono predette dalla teoria, ma misurate. Possiamo chiederci quale informazione ci diano i loro valori e quanto dipenda da essi la fisica e la cosmologia che osserviamo. Queste domande hanno occupato i fisici negli ultimi decenni e sono in larga parte questioni aperte. La visione moderna della teoria delle interazioni fondamentali considera il modello standard una teoria "efficace" (ovvero non fondamentale) valida alla scala elettrodebole (ovvero a un'energia dell'ordine di 100 GeV definita dalle masse dei bosoni W e Z, mediatori delle interazioni elettrodeboli), che deriva da una teoria più fondamentale che descrive la fisica a energie più alte.
Questo deve accadere necessariamente alla scala di Planck (dell'ordine di 10^{19} GeV, vd. approfondimento a p. 8), ma ci sono indizi che suggeriscono che potrebbe esserci una nuova teoria anche a energie più basse. Una forte indicazione viene dal fatto che le costanti di accoppiamento delle interazioni fondamentali, che variano con l'energia, assumono valori simili a scale dell'ordine dei 10^{16} GeV, alle quali una teoria di grande unificazione (vd. fig. c) potrebbe descrivere le interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche in termini di una sola costante di accoppiamento.
Tuttavia, nel modello standard le tre costanti si avvicinano, ma non si intersecano nello stesso punto, suggerendo la necessità di un'ulteriore teoria oltre il modello standard a una scala più bassa della scala di Planck per modificare opportunamente la dipendenza delle costanti dall'energia (ad esempio, la supersimmetria a energie dell'ordine del TeV, che però non è stata osservata negli esperimenti di LHC).
C'è poi la questione della "naturalezza" che ha guidato la fisica teorica per molto tempo. Il concetto di naturalezza, di cui esistono diverse formulazioni, può essere illustrato attraverso l'esempio del modello standard, che non è una teoria naturale a causa della massa del bosone di Higgs. Assumendo il modello valido fino alla scala di Planck, il valore "naturale" della massa del bosone di Higgs (M_H) è dell'ordine della massa di Planck, cioè 10^{19} GeV. È necessaria una cancellazione di molti ordini di grandezza *(fine tuning)* tra il parametro M_H, che compare nella teoria, e le correzioni quantistiche dovute all'interazione tra il bosone di Higgs e le altre particelle del modello, per ottenere il valore misurato di 125 GeV. Il *fine tuning* può apparire come un problema matematico, ma ha invece profonde implicazioni fisiche: immaginate di avere una nuova teoria, valida vicino alla scala di Planck, in grado di calcolare la massa del bosone di Higgs in termini di una nuova costante d'accoppiamento o della massa di una nuova particella. Un forte *fine tuning* implica che è necessario misurare queste nuove costanti con



c.
Running (variazione) delle costanti di accoppiamento elettromagnetica, debole e forte con l'energia: a energie dell'ordine di 10^{16} GeV (l'energia di grande unificazione) ci si aspetta che convergano verso un valore comune.

[as] approfondimento

Le grandezze di Planck

Le costanti universali possono essere combinate tra loro per ottenere altre costanti. Tra queste, giocano un ruolo importante le cosiddette "grandezze planckiane", m_P, l_P e t_P, che si ottengono combinando $\hbar$, c, G e che hanno un significato fisico importante: definiscono le scale di massa, lunghezza e tempo alle quali gli effetti quantistici e quelli relativistici sono confrontabili. Il modello standard delle particelle elementari, la teoria quantistica di campo che descrive le interazioni fondamentali forte, debole ed elettromagnetica, ma non include la gravità, può essere valido al più fino all'energia $m_P c^2 = 1{,}22 \times 10^{19}$ GeV, associata alla massa di Planck, raggiunta la quale le interazioni gravitazionali tra le particelle elementari non sono più trascurabili. Similmente il modello standard della cosmologia non può descrivere tempi minori o uguali al tempo di Planck t_P, circa 10^{-43} secondi, quando la teoria della relatività generale non è più sufficiente, gli aspetti quantistici della gravità diventano importanti e la stessa struttura dello spaziotempo potrebbe essere molto diversa da quella che conosciamo.
Se si fanno entrare in gioco anche ε_0 e k_B, possono essere costruite altre due combinazioni di costanti, q_P e T_P, rispettivamente carica e temperatura di Planck. La temperatura di Planck, pari a circa 10^{32} K, può essere considerata come la massima temperatura che è possibile definire all'interno del quadro teorico attuale.
La carica di Planck, a differenza delle altre grandezze planckiane, non coinvolge G, pertanto non è legata all'interazione gravitazionale e si pone su un piano diverso rispetto alle altre. Mentre le altre grandezze planckiane sono molto lontane dai valori oggi accessibili sperimentalmente, la carica di Planck è solo di un ordine di grandezza maggiore della carica dell'elettrone, suggerendo così che quest'ultima è prossima al suo valore "naturale".

QUANTITÀ	ESPRESSIONE	VALORE METRICO
lunghezza	$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1{,}61609735 \times 10^{-35}$ m
massa	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	21,7664598 μg
tempo	$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5{,}3907205 \times 10^{-44}$ s
carica elettrica	$q_P = \sqrt{\hbar c (4\pi\varepsilon_0)}$	$1{,}87554573 \times 10^{-18}$ C
temperatura	$T_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}}$	$1{,}4169206 \times 10^{32}$ K

1.
Grandezze di Planck, ottenute combinando $\hbar$, c e G in modo da ottenere una lunghezza, una massa, un tempo, una carica elettrica e una temperatura.

d.
Vista di un segmento della *beam pipe* di LHC.

una precisione inverosimile per ottenere il valore corretto di M_H. Ancora più innaturale, in questo caso per 120 ordini di grandezza, è il valore misurato della costante cosmologica della relatività generale, se interpretata come energia del vuoto.
Il requisito di naturalezza ha motivato e guidato per molti anni la ricerca di teorie oltre il modello standard, portando tipicamente, nei diversi modelli proposti, all'aspettativa di nuova fisica alla scala del TeV. La mancata osservazione di questa nuova fisica da parte degli esperimenti a LHC ha messo in discussione la richiesta di naturalezza e spinto a cercare motivazioni teoriche che giustifichino il *fine tuning*. In questa direzione, tra le idee più dibattute degli ultimi anni c'è il "principio antropico" (vd. anche in Asimmetrie n. 28 p. 30, ndr).
L'osservazione da cui scaturisce il principio antropico è che la cosmologia e la fisica che osserviamo dipendono in maniera cruciale dai valori delle costanti di accoppiamento delle interazioni gravitazionali, elettromagnetiche e forti, delle masse dei fermioni, della costante cosmologica, ecc. Variazioni relativamente piccole di questi valori conducono a un universo molto diverso da quello in cui viviamo e facilmente inadatto allo sviluppo della vita intelligente (almeno come ce la aspettiamo). Ad esempio, la differenza di massa tra protone e neutrone dipende fortemente dai valori delle masse dei quark up e down e dall'accoppiamento elettromagnetico. Bastano piccole variazioni di queste costanti per rendere il protone più pesante del neutrone e quindi instabile, producendo degli elementi chimici completamente diversi da quelli che conosciamo. Analogamente, una gravità sostanzialmente più debole non avrebbe portato alla formazione delle galassie, mentre una variazione relativamente piccola dell'intensità relativa tra gravità ed elettromagnetismo avrebbe prodotto stelle più fredde e messo in pericolo la produzione di elementi pesanti nell'universo. Una riduzione della costante di accoppiamento forte di meno di un ordine di grandezza rallenterebbe la nucleosintesi nelle stelle, mettendo a rischio la produzione di carbonio e ossigeno e, viceversa, un aumento porterebbe a consumare tutto l'idrogeno nell'universo primordiale. La conclusione di tutto

e.
La natura che ci circonda è conseguenza diretta del valore delle costanti di accoppiamento.

questo, il principio antropico appunto, è che un universo adatto per la vita intelligente (in altre parole abbastanza strutturato, non troppo freddo, con ossigeno, carbonio ed elementi pesanti) debba essere necessariamente "innaturale", perché ha bisogno di valori e correlazioni molto particolari tra le costanti fisiche (in questa accezione di naturalezza, la correlazione da spiegare non è solo tra i due contributi che determinano il valore di una costante, ma anche tra le diverse costanti).
Per quanto affascinante, il principio antropico è controverso per molti aspetti: è una vera spiegazione della mancanza di naturalezza o scambia solo causa ed effetto? Ha senso introdurre una probabilità per un insieme di valori delle costanti fisiche per poter affermare che è improbabile o innaturale? Anche accettando il principio, visto che esistono teorie più naturali dei modelli standard in cui la vita è possibile, perché non sono realizzate in natura? Come vedete, dalle costanti fisiche c'è molto da imparare.

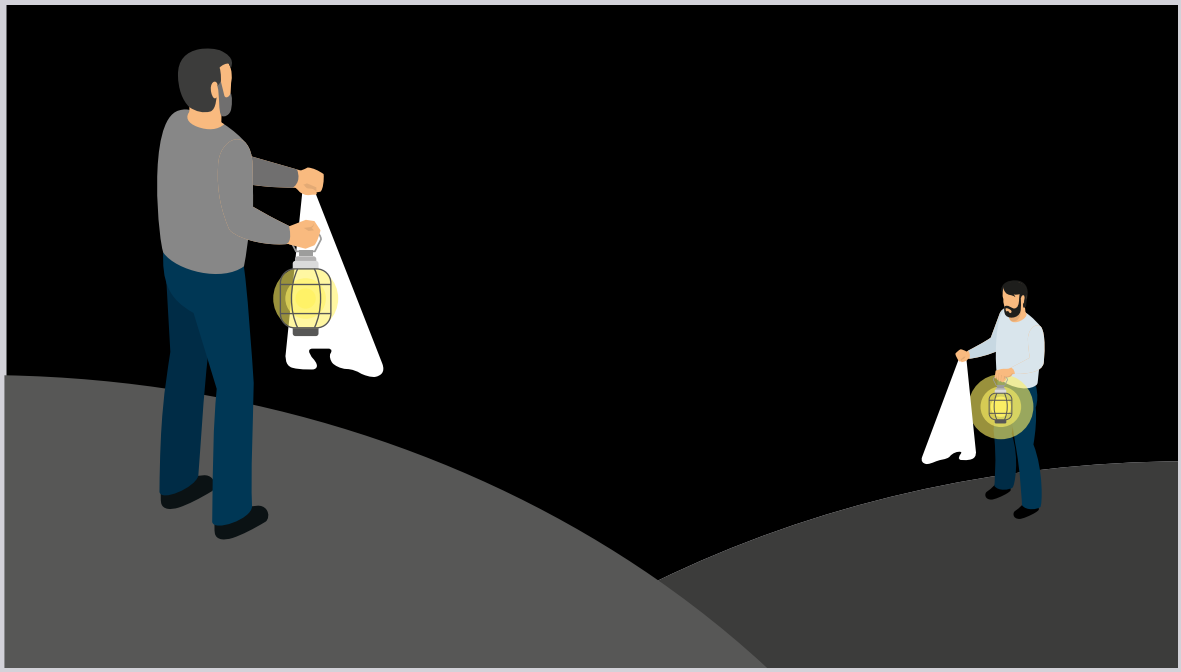
Biografia
Marco Ciuchini è un fisico teorico, dirigente di ricerca dell'INFN. È stato direttore della sezione di Roma Tre e attualmente è un componente della Giunta Esecutiva INFN. Si occupa di fenomenologia delle particelle elementari e ha lavorato prevalentemente su argomenti di fisica elettrodebole e del sapore dei quark.

10.23801/asimmetrie.2025.38.1

Speed limit

La velocità della luce

di Stefano Marcellini



a.
Raffigurazione dell'esperimento che Galileo ideò per misurare la velocità della luce.

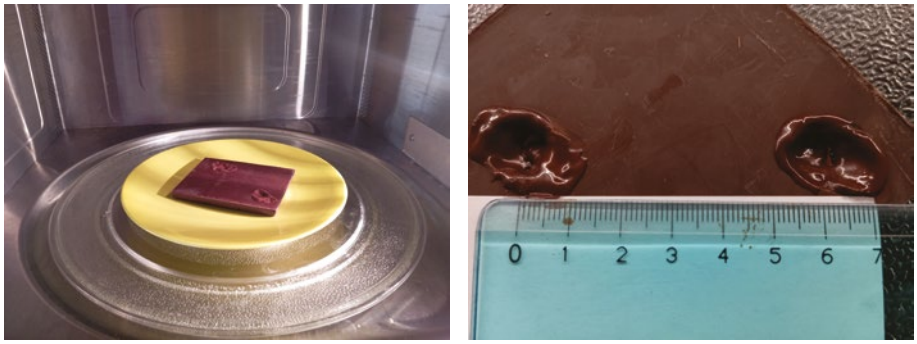
Il primo a ipotizzare una misura della velocità della luce fu Galilei. L'esperimento prevedeva che si recasse su un colle con una lanterna e uno schermo, mentre un suo assistente, anch'egli con una lanterna e uno schermo, si sarebbe piazzato su un altro colle distante circa un chilometro. Galilei avrebbe quindi scoperto la propria lanterna e l'assistente, a seguito della ricezione del segnale luminoso, avrebbe scoperto la sua, mentre lo scienziato pisano misurava il tempo impiegato dalla luce per percorrere il tragitto di andata e ritorno usando il battito del polso.
Non sappiamo se Galilei effettuò veramente questo esperimento. Tuttavia, la luce viaggia troppo velocemente per poterne misurare la velocità in questo modo: essa, infatti, percorre un chilometro in poco più di 3 milionesimi di secondo. Decisamente troppo poco per la tecnica ipotizzata da Galilei e in generale per le tecnologie dell'epoca. Ma questo esperimento, che oggi ci può apparire ingenuo nella modalità con cui era stato concepito, ci racconta come in realtà all'epoca non si avesse una reale percezione del valore della velocità della luce, che da alcuni era considerata perfino infinita.
Fu Ole Rømer, nel 1476, a mostrarne per primo il valore finito. Studiando le eclissi del satellite Io da parte di Giove, egli osservò che gli intervalli di tempo tra eclissi successive diminuivano quando la Terra era in avvicinamento a Giove e, invece, aumentavano quando era in fase di allontanamento. Questo suggerì che la luce impiegasse un tempo finito nel percorrere il tragitto da Giove alla Terra, e quindi diverso nei due casi, e che la sua velocità fosse tale da permettere di apprezzarne le differenze al variare della distanza percorsa.
Comunemente identificata dalla lettera *c*, dal latino *celeritas,* il suo valore più accurato è oggi pari a 299.792.458 m/s, e rappresenta il limite superiore

[as] approfondimento

La relatività e la velocità della luce

Il principio di relatività afferma che le leggi della fisica sono le stesse nella loro formulazione matematica in qualunque sistema di riferimento inerziale. Galilei scrive di questo in un bellissimo passo del "Dialogo sopra i massimi sistemi del mondo", descrivendo come tutto appaia come se stessimo fermi se fossimo sottocoperta di un vascello, senza sapere che in realtà ci stiamo muovendo. Non avremmo leggi fisiche a cui appellarci per dirci fermi o in moto.
Poi però, alla fine dell'800, si scoprono i fenomeni elettromagnetici, che vengono sintetizzati in quattro relazioni matematiche: le equazioni di Maxwell. In quelle quattro equazioni è racchiuso anche il modo in cui i campi elettrico e magnetico si propagano nello spazio attraverso le onde elettromagnetiche, ovvero la luce. Non solo: quelle equazioni contengono al loro interno un termine costante, combinazione della costante dielettrica ε_0 e della permeabilità magnetica del vuoto μ_0 , che è la velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto, cioè la velocità della luce c ($c^2 = 1/(\varepsilon_0\mu_0)$).
Se questa velocità cambiasse al variare del sistema di riferimento in cui ci troviamo, come succede per qualunque velocità (un'automobile ci appare ferma se la osserviamo da un'altra auto che corre accanto ad essa alla stessa velocità), avremmo un sistema di riferimento speciale, in cui valgono le equazioni di Maxwell, e tutti gli altri sistemi di riferimento in cui la velocità della luce non vale c. Disporremmo quindi di uno strumento per poterci dire fermi o in moto utilizzando i fenomeni elettromagnetici, per i quali il principio di relatività non sarebbe più valido. Un bel problema, perché, tanto per dirne una, il nostro corpo è un laboratorio di elettromagnetismo e quindi il suo funzionamento sarebbe diverso sul divano o sull'autobus o se consideriamo la nostra velocità rispetto a qualunque corpo celeste nell'universo – il mondo ci risulterebbe incomprensibile!
L'alternativa è che quella velocità sia una costante. Einstein lo pose come postulato, ma gli esperimenti ne hanno mostrato la validità. Le conseguenze di tutto questo si chiamano teoria della relatività ristretta.
Dal punto di vista sperimentale, la misura monodirezionale della velocità della luce da una sorgente a un ricevitore necessita di una convenzione sulla sincronizzazione degli orologi alla sorgente e al ricevitore. Nessuna convenzione è invece necessaria per una misura di andata e ritorno, in cui la luce viene riflessa da uno specchio, poiché in questo caso si utilizza un solo orologio. Si assume quindi che la luce abbia un comportamento simmetrico e che, come scrive Einstein nel 1905, il tempo di andata sia uguale a quello di ritorno.

1.
Ritratto di un giovane James Clerk Maxwell.



b.
Una misura di *c* concettualmente uguale a quanto descritto si può ottenere mettendo per pochi secondi una tavoletta di cioccolata nel forno a microonde (vd. foto a sinistra), che ha una frequenza fissa di 2,45 GHz, e avendo avuto cura di bloccare la rotazione del piatto. I due punti in cui la tavoletta si scioglie distano mezza lunghezza d'onda (ca. 6 cm, vd. foto a destra). Moltiplicando questa distanza (misurata ad esempio in cm) per due e per 2,45 GHz, si ottiene il valore di *c* in cm/s. Un raro caso in cui, terminato l'esperimento, si può mangiare l'apparato sperimentale!

della velocità a cui la materia e l'energia possono propagarsi nello spazio, rappresentando quindi anche il limite alla velocità di trasferimento dei segnali e delle informazioni.
Tutte le forme di radiazione elettromagnetica, dai raggi gamma alle onde radio, viaggiano nel vuoto a velocità *c*, valore che è indipendente dalla velocità della sorgente o del ricevitore. Anche qualunque particella di massa nulla e le perturbazioni dei campi ad esse associati si propagano nel vuoto alla velocità della luce. Invece, i corpi dotati di massa a riposo non nulla non possono mai eguagliare né tantomeno superare la velocità della luce, che costituisce quindi un limite imposto dalla Natura.
I risultati sperimentali della fisica subnucleare e il funzionamento stesso degli acceleratori di particelle forniscono innumerevoli prove sperimentali a riguardo.
L'indipendenza di *c* dal sistema di riferimento è strettamente legata alla teoria della relatività ristretta, formulata da Einstein nel 1905 (vd. approfondimento).
Tramite il valore di *c*, e una definizione del secondo ottenuta dalla fisica atomica, dal 2019 il metro è definito come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a $1/c$ secondi. Le misure più precise di *c* sono oggi ottenute utilizzando luce laser di cui è nota la frequenza *f*, mentre la lunghezza d'onda λ viene misurata con tecniche di interferometria. Il valore di *c* è il prodotto tra la lunghezza d'onda e la frequenza ($c = \lambda f$) (vd. fig. b).
La costanza della velocità della luce rende le coordinate spaziali *x*, *y* e *z* e quella temporale moltiplicata per *c* (*ct*) grandezze fra loro omogenee e permette di introdurre il concetto di "spaziotempo".
Sebbene nel vuoto la velocità della luce sia sempre costante, in un mezzo diverso dal vuoto essa è dipendente dalle caratteristiche del mezzo, ed è caratterizzata dal cosiddetto "indice di rifrazione", definito come il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e quella nel mezzo in questione. Ad esempio, per la luce visibile, l'indice di rifrazione nell'aria differisce dal valore 1 solo dello 0,3 per mille, mentre nell'acqua a 20 °C esso vale 1,33. Se l'acqua è quindi un discreto "rallentatore" della luce, il diamante lo è ancora di più, nonostante la sua trasparenza: il suo indice di rifrazione è infatti 2,4.
Il fatto che in un mezzo diverso dal vuoto la luce viaggi a velocità inferiori a *c* permette che particelle dotate di massa possano muoversi in quel mezzo a una velocità superiore a quella che ha la luce nello stesso mezzo. Questo dà origine a un fenomeno detto "effetto Cherenkov", che è comunemente usato per realizzare rivelatori di particelle (vd. anche in Asimmetrie n. 10 p. 27, ndr).
In astronomia, la velocità della luce rappresenta il limite fondamentale nell'osservazione dell'universo. Infatti osservare l'universo distante ci permette di vederlo come era nel passato, e quindi di studiarne l'evoluzione indietro nel tempo fino all'epoca in cui non esistevano ancora le galassie, a ridosso del Big Bang.

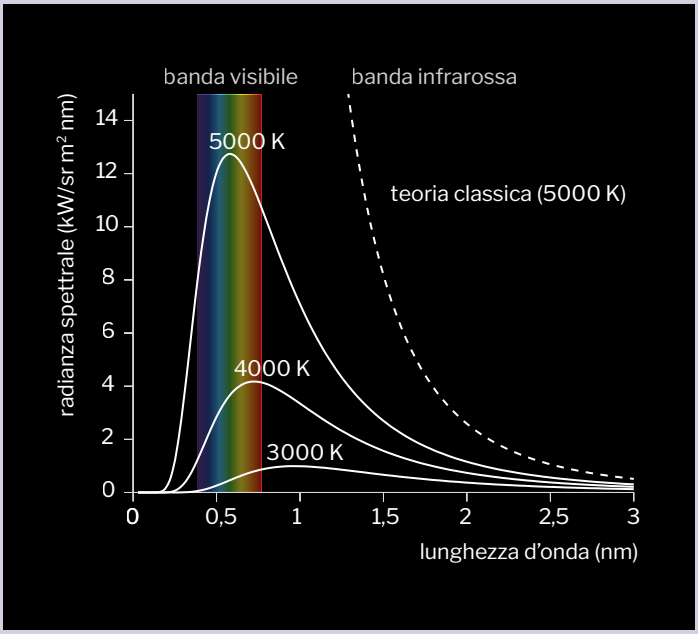
Biografia
Stefano Marcellini è ricercatore presso la sezione di Bologna dell'INFN e ha sempre lavorato in esperimenti agli acceleratori del CERN. Si interessa di divulgazione e comunicazione della scienza, e da qualche anno fa parte della Commissione Terza Missione dell'INFN, che si occupa di coordinare progetti e attività di disseminazione scientifica presso le scuole e il pubblico.

10.23801/asimmetrie.2025.38.2

Quanto basta per evitare una catastrofe

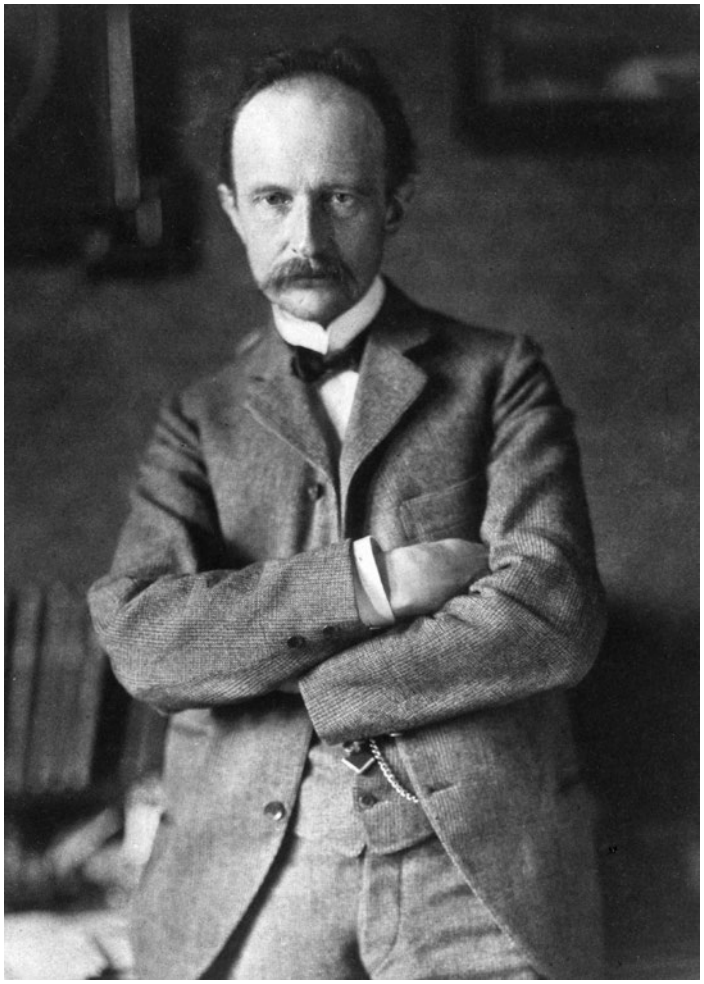
La costante di Planck

di Angelo Bassi



a.
Spettro di emissione del corpo nero. L'intensità della radiazione emessa dal corpo mostra un andamento prima crescente e poi decrescente al variare della lunghezza d'onda. La teoria classica, in totale disaccordo con le osservazioni, prediceva un andamento che continuava a crescere al diminuire della lunghezza d'onda (catastrofe ultravioletta). La teoria di Planck (curve continue) spiega invece perfettamente quanto misurato. Le curve sono mostrate per varie temperature del corpo nero.

La costante di Planck, $h = 6{,}62607015 \times 10^{-34}$ joule secondo (ovvero la sua versione divisa per 2π, $\hbar = h/2\pi$), è la costante fondamentale della meccanica quantistica, la teoria che, sviluppata all'inizio del secolo scorso, descrive il comportamento di atomi e molecole. Con il tempo, questa teoria ha assunto un ruolo di primo piano, estendendosi a quasi tutti i campi della fisica, dalle particelle elementari alla cosmologia. La costante h ha una data di nascita, il 14 dicembre 1900, quando il fisico tedesco Max Planck pubblicò il suo celebre articolo che offriva una soluzione al problema del corpo nero.
In quel periodo, la fisica classica, dominata dalla meccanica di Newton e dall'elettromagnetismo di Maxwell, sembrava offrire una visione del mondo coerente e completa. L'attenzione dei fisici si stava quindi concentrando sulla relazione tra radiazione e materia, un tema che tuttora rimane centrale nella ricerca scientifica. Tuttavia, nessuno immaginava che le scoperte imminenti avrebbero portato al crollo della fisica classica, basata sul determinismo delle particelle in movimento sotto l'azione di forze, e alla nascita di una teoria radicalmente nuova e ancora oggi oggetto di dibattito.
Il "corpo nero", un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione ricevuta senza rifletterla (da cui il nome), può comunque emettere radiazione in funzione della sua temperatura, dovuta all'agitazione termica degli atomi che lo compongono. Prima di Planck, era noto che la radiazione emessa dal corpo nero dipendeva solo dalla temperatura e non dalla sua composizione. Questa caratteristica universale indicava che lo studio del corpo nero poteva rivelare aspetti fondamentali dell'interazione tra radiazione e materia, ed è proprio ciò che avvenne.



b.
Max Planck nel 1918, anno in cui ricevette il premio Nobel per la fisica.

Il problema risiedeva nel fatto che, secondo la fisica classica, la radiazione emessa avrebbe dovuto essere infinita, un risultato paradossale noto come "catastrofe ultravioletta" (vd. fig. a). Planck riuscì per primo a risolvere il problema, introducendo l'idea che l'energia non veniva scambiata in modo continuo, come previsto dalla teoria classica, ma in pacchetti discreti che successivamente presero il nome di "quanti". L'energia di ciascun quanto era proporzionale alla frequenza della radiazione secondo la formula $E = h\nu$, dove ν è la frequenza e h la costante di proporzionalità.
All'inizio, lo stesso Planck non comprese appieno il significato rivoluzionario della sua ipotesi. Tuttavia, negli anni successivi, altri fisici, come Albert Einstein, ripresero questa idea per spiegare altri fenomeni come l'effetto fotoelettrico, rafforzando la validità della teoria. Nel 1918, Planck ricevette il premio Nobel per la fisica per "la scoperta dei quanti di energia", consacrando il suo contributo al progresso della fisica moderna.
Oggi, la costante di Planck è onnipresente in ogni fenomeno quantistico ed è integrata nell'equazione di Schrödinger, che descrive il comportamento delle particelle su scala atomica. Ad esempio, i livelli energetici degli atomi, anch'essi discreti, dipendono in maniera cruciale da h e costituiscono la base della moderna comprensione della chimica e della scienza dei materiali. Questo, a sua volta, ci permette di spiegare la struttura stessa del mondo in cui viviamo.
Il valore numerico di h, espresso in unità macroscopiche (metro, chilogrammo e secondo), è estremamente piccolo, il che indica che i fenomeni quantistici non sono direttamente visibili nella nostra vita quotidiana. Il mondo che percepiamo ci appare continuo e classico, senza salti o discontinuità, proprio come l'acqua di un mare ci appare uniforme anche se è composta da molecole microscopiche. Tuttavia, a livello fondamentale, siamo costantemente immersi nella meccanica quantistica, dato che la luce e la materia che costituiscono il nostro mondo seguono le sue leggi.
Grazie a questa teoria, abbiamo tecnologie che fanno parte della nostra vita quotidiana, come il laser e il transistor, quest'ultimo essendo alla base dei computer e degli smartphone.
Le applicazioni della meccanica quantistica si estendono anche al campo medico, con tecniche di diagnosi avanzate come la risonanza magnetica nucleare. Guardando al futuro, si stanno sviluppando nuovi dispositivi come computer quantistici, sensori quantistici e metodi di comunicazione

c.
Computer e smartphone non esisterebbero senza la teoria della meccanica quantistica.

quantistici, che promettono un impatto ancora maggiore sulla nostra vita quotidiana.
Tuttavia, questa teoria presenta un paradosso: prevede che tutti gli oggetti si comportino come pacchetti di onde di materia, i quali dovrebbero diffondersi e dissolversi nel tempo, ma nella realtà questo non accade. Questo concetto è legato al famoso paradosso del gatto di Schrödinger (vd. in Asimmetrie n. 33 p. 22, ndr), un esperimento mentale proposto da Erwin Schrödinger nel 1935 per dimostrare che, secondo la meccanica quantistica, un gatto (o qualsiasi altro essere vivente) potrebbe trovarsi in uno stato di sovrapposizione, essendo sia vivo che morto allo stesso tempo. Il paradosso mette in luce un problema della teoria quando applicata al mondo macroscopico, evidenziando la difficoltà di conciliare la fisica classica con la meccanica quantistica.
Infine, come possiamo misurare *h*? Un metodo semplice è quello di utilizzare la formula originale di Planck $E = h\nu$. Per questo serve una sorgente che emetta fotoni a una frequenza ben definita, come un LED stimolato da una differenza di potenziale elettrico. Misurando la frequenza dei fotoni emessi al variare dell'energia applicata, si può tracciare un grafico di *E* in funzione di *v*. La pendenza di questa linea retta rappresenta il valore di *h* e, con un po' di pratica e strumenti non troppo costosi, questo esperimento è alla portata di chiunque voglia cimentarsi nella misurazione di una delle costanti fondamentali dell'universo.
La costante di Planck non è solo una cifra misteriosa nel mondo della fisica dei quanti, ma un elemento chiave che ha aperto la strada alla comprensione del mondo microscopico e ha portato a sviluppi tecnologici che plasmano la nostra vita quotidiana e il nostro futuro.

Biografia
Angelo Bassi è laureato e dottorato in fisica all'Università di Trieste. Ha lavorato al Centro Internazionale di Fisica Teorica di Trieste e successivamente in Germania a Monaco come Marie Curie Fellow. Ora è professore ordinario all'Università di Trieste. Le sue ricerche riguardano la meccanica quantistica e i suoi fondamenti.

10.23801/asimmetrie.2025.38.3

Attrazione fatale

La costante di Newton

di Paolo Pani

a.
La statua di Sir Isaac Newton con una mela ai suoi piedi, nel Museo di Scienze Naturali dell'Università di Oxford.

Tutto gravita. Ogni forma di materia, energia, particella o corpo celeste… perfino lo stesso campo gravitazionale! Fra le quattro interazioni fondamentali, solo quella gravitazionale ha questa natura universale.
Isaac Newton fu il primo a comprendere questa proprietà, quando nel 1687 scoprì che esiste una singola legge fisica che descrive sia l'attrazione dei corpi verso il centro della Terra che il moto dei pianeti nel sistema solare. La sua "legge di gravitazione universale" implica che l'attrazione gravitazionale fra due masse qualsiasi è proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. La costante di proporzionalità nella legge di Newton viene comunemente indicata con *G* e prende il nome di "costante di gravitazione universale", o "costante di Newton". Nonostante prenda il suo nome, Newton non fu in grado di misurare il valore di *G*, che fu invece misurato per la prima volta da Henry Cavendish nel 1798, con il famoso esperimento della bilancia di torsione. L'apparato di Cavendish era costituito da una barra orizzontale sospesa a un filo e dotata di due sfere di piombo alle estremità. Avvicinando altre due sfere di massa nota alle prime, Cavendish riuscì a osservare una minuscola torsione del filo causata dalla forza gravitazionale tra le sfere, permettendo di misurare *G*.
La difficoltà di tale misura sta nel fatto che il valore numerico di *G* è estremamente piccolo rispetto ad altre costanti fondamentali. Nel sistema internazionale, *G* è approssimativamente $6{,}67 \times 10^{-11}$ N m^2/kg^2. Facendo un confronto improprio (dal momento che si tratta di grandezze con unità differenti), la costante elettrostatica legata alla legge di Coulomb (analogo della legge di Newton per la forza tra cariche elettriche) è circa 20 ordini di grandezza più grande. Questa stima fornisce un'idea del perché l'interazione gravitazionale sia completamente trascurabile nel mondo microscopico.
Come mai, allora, la costante *G* gioca un ruolo così importante nella fisica? Il motivo è che, oltre a essere universale, l'interazione gravitazionale ha un'altra proprietà peculiare: è sempre attrattiva. Per i singoli protoni ed elettroni l'attrazione gravitazionale è trascurabile, ma quando queste particelle con carica positiva e negativa si combinano in gran numero a formare oggetti macroscopici, la loro carica globale è neutralizzata, mentre la massa totale cresce, e con essa il campo gravitazionale attrattivo che questa massa genera. È questo il motivo per cui l'interazione fra la Terra e la Luna è

b.
Nel 2014 l'esperimento MAGIA dell'INFN ha effettuato una misura di precisione di *G*, sfruttando un interferometro quantistico (in foto), in cui gli atomi vengono intrappolati dalla luce laser a una temperatura vicina allo zero assoluto. Questo risultato è stato incluso tra quelli utilizzati dal Committee on Data for Science and Technology (CODATA) per definire il valore della costante gravitazionale *G* e ha stimolato altri esperimenti basati su sensori quantistici atomici: l'esperimento MEGANTE dell'INFN, uno in costruzione in Cina, uno negli USA e altri in fase di proposta.

Biografia
Paolo Pani è professore di fisica teorica all'Università Sapienza di Roma e presso la sezione INFN di Roma1. È co-autore dei libri "General Relativity and its Applications" e "Superradiance: New frontiers in black-hole physics", oltre che di numerose pubblicazioni scientifiche sulla teoria della gravitazione, buchi neri, stelle di neutroni, onde gravitazionali e le loro implicazioni per la fisica fondamentale.

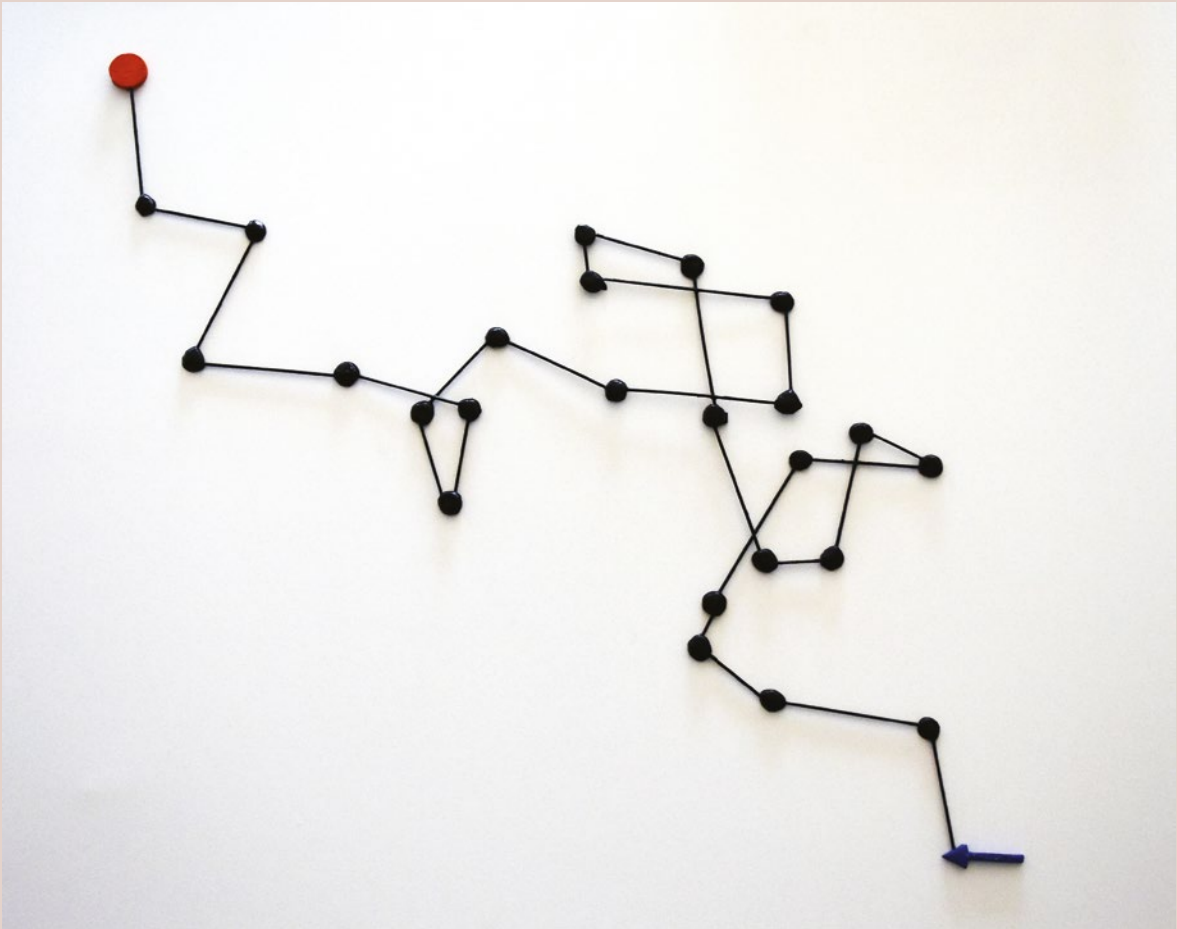
10.23801/asimmetrie.2025.38.4

sostanzialmente gravitazionale, e per cui la costante *G*, infima nel mondo microscopico, governa invece l'universo su scala astronomica e cosmologica.
Tutte le leggi che regolano la struttura delle stelle, delle galassie, le orbite dei pianeti e dei satelliti, e perfino l'evoluzione dell'universo nel suo complesso, dipendono direttamente da *G*.
Con l'avvento della relatività generale di Albert Einstein nel 1915, la comprensione della gravità si è ulteriormente arricchita. Einstein descrisse la gravità non come una forza, ma come la curvatura dello spaziotempo generata dalla massa e dall'energia. Anche in questo caso *G* mantiene un ruolo cruciale, poiché appare nelle equazioni di campo di Einstein, che governano la dinamica dello spaziotempo: *G* stabilisce l'intensità della curvatura generata da una determinata massa.
Il valore di *G* ha implicazioni profonde. Un valore di *G* più grande implicherebbe una forza gravitazionale più forte, con conseguenze sulla formazione delle stelle, delle galassie e persino sulla possibilità della vita. Viceversa, un *G* più piccolo porterebbe a un universo più espanso, in cui gli oggetti celesti (galassie, stelle, buchi neri) si formerebbero con più difficoltà e avrebbero proprietà diverse da quelle che conosciamo.
Misurare *G* con precisione è una sfida notevole per la fisica sperimentale, a causa della debolezza della forza gravitazionale. Esperimenti moderni utilizzano bilance di torsione sofisticate, interferometria laser per misurare minime variazioni di posizione fra masse, misurazioni di masse in caduta libera, interferometria atomica per misurare l'accelerazione gravitazionale generata da una massa nota (come nell'esperimento MAGIA, vd. fig. b) e in generale tecniche avanzate per ridurre al minimo le influenze esterne. Alcuni errori sistematici sono ineliminabili, come ad esempio le forze di marea della Luna e del Sole. Nonostante secoli di miglioramenti tecnologici, *G* è ancora una delle costanti fondamentali della fisica note con minor precisione.
Inoltre, la difficoltà nel misurare *G* con precisione suscita interrogativi sulla sua natura: potrebbe il valore di *G* variare nello spazio e nel tempo, come suggerito da alcune teorie cosmologiche alternative? Questi quesiti spingono i fisici a esplorare nuove tecniche di misurazione e a sviluppare teorie che potrebbero ridefinire la nostra comprensione della gravitazione.
La costante di gravitazione universale *G* gioca un ruolo importante in alcuni dei problemi aperti della fisica teorica. Il principale è la mancata unificazione della gravità con le altre forze fondamentali, come l'elettromagnetismo e le forze nucleari, in una teoria quantistica della gravità. Un altro è il paradosso della perdita di informazione durante l'evaporazione dei buchi neri, uno dei pochi ambiti in cui *G* interagisce con altre costanti fondamentali, come la costante di Planck e quella di Boltzmann. In generale, *G* è essenziale per le equazioni che governano il comportamento dei buchi neri, l'espansione dell'universo e altri fenomeni cosmologici della fisica contemporanea. Per questo motivo, nonostante sia in giro da oltre tre secoli, rimane un pilastro fondamentale nella fisica e una frontiera aperta per la scoperta scientifica.

La rivincita del disordine

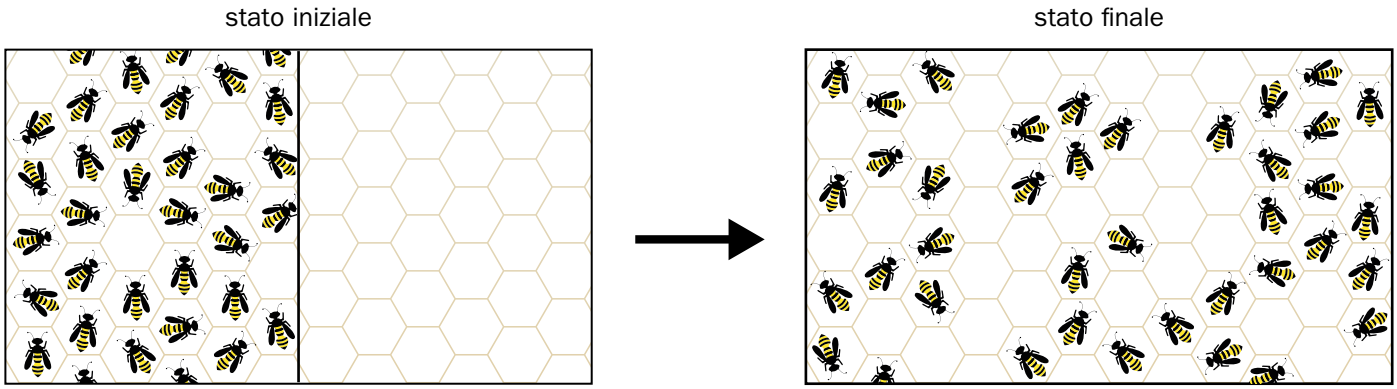
La costante di Boltzmann

di Irene Giardina



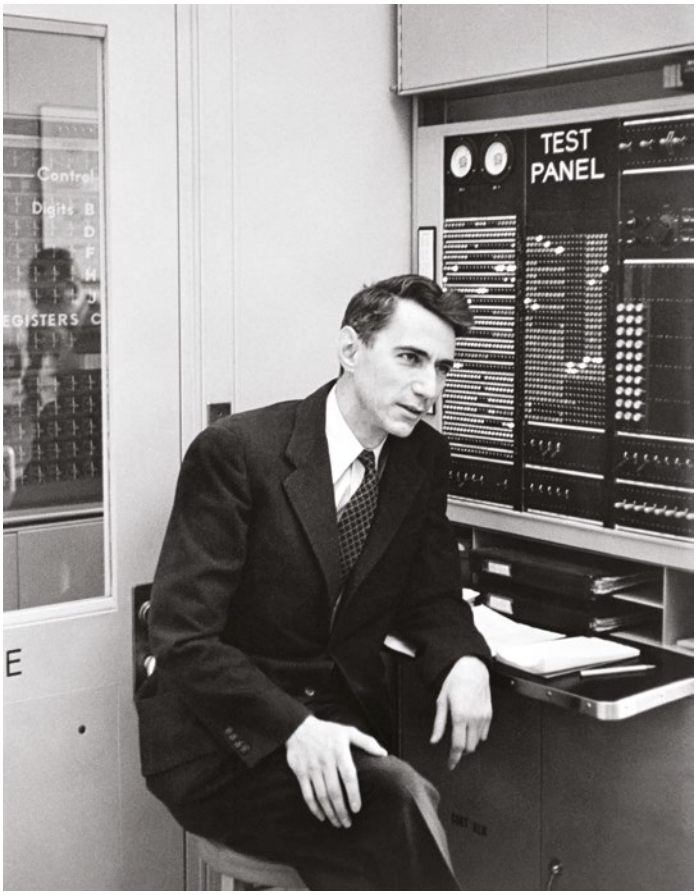
La termodinamica nacque all'inizio dell'800 come la teoria che descrive le trasformazioni che coinvolgono calore e lavoro. Il calore rappresenta una forma di energia, la cui conservazione viene stabilita dal primo principio della termodinamica. Nella seconda metà dell'800 l'interesse si spostò invece verso lo studio di quali processi termodinamici possono avvenire e quali no e su quali fenomeni e trasformazioni possano avvenire spontaneamente e quali no, portando così alla formulazione del secondo principio della termodinamica. L'introduzione del concetto di "entropia" e il collegamento con la teoria microscopica dei gas hanno origine proprio in quegli anni dai contributi fondamentali di Rudolf Clausius, Planck e in particolare di Ludwig Boltzmann (vd. p. 33, ndr.). Ed è qui che entra in gioco la costante di Boltzmann k_B, che collega la termodinamica a un'altra fondamentale branca della fisica, la meccanica statistica, che studia il comportamento di sistemi composti da tantissime molecole. Questo collegamento avviene attraverso delle leggi estremamente eleganti che hanno implicazioni più ampie, arrivando a coinvolgere anche concetti come il disordine e l'informazione.

a.
"Passeggiata costante di Boltzmann", opera su legno fimo e olio di Roberto Zingoni. La scultura raffigura la traiettoria del moto browniano di una particella, a partire dalla quale è stato misurato il valore della costante di Boltzmann.



b.
Esempio di aumento di entropia. Inizialmente le api sono vincolate a stare tutte in un settore dell'alveare (configurazione a bassa entropia). Se togliamo il vincolo, possono muoversi liberamente in tutto lo spazio disponibile e con alta probabilità lo occuperanno in modo uniforme, aumentando l'entropia. Il corrispettivo termodinamico di questo esempio è l'espansione libera di un gas perfetto.

In termodinamica, k_B ha innanzitutto il compito cruciale di legare tra loro la temperatura assoluta (T) di un sistema e la sua energia interna, permettendoci di collegare l'una con l'altra. Questa connessione compare già nella celebre legge dei gas perfetti $PV = N k_B T$ (dove P è la pressione, V il volume e N il numero di molecole), formulata nella prima metà dell'800 a partire dalle osservazioni sperimentali di Robert Boyle, Joseph L. Gay-Lussac, Émile Clapeyron e altri fisici dell'epoca. Questa equazione mostra che il prodotto di k_B con T ha le dimensioni fisiche di un'energia e fornisce la scala energetica tipica di una particella in un gas a pressione e volume dati. Ciò è ancora più evidente nell'espressione esplicita dell'energia interna di un gas perfetto, ottenuta con la teoria cinetica da Maxwell e Ludwig Boltzmann nella seconda metà dell'800, in cui l'energia del gas risulta proporzionale proprio al numero di molecole e al prodotto di k_B con T.
Il ruolo più significativo della costante di Boltzmann, nonché quello con maggiore rilevanza nelle applicazioni moderne, è legato però a un'altra quantità fisica, l'"entropia". Esistono varie definizioni di entropia e ognuna è per certi aspetti rilevante per la sua comprensione. In termodinamica, il concetto di entropia è dovuto a Clausius, che la introdusse come funzione di stato (una grandezza che permette di definire lo stato di un sistema) e ne diede una definizione operativa legando le variazioni di entropia al rapporto tra il calore scambiato dal sistema e la sua temperatura. Usando l'entropia, il secondo principio della termodinamica asserisce che in un sistema isolato l'entropia non può mai diminuire. Questa relazione stabilisce una direzione del tempo (quella in cui l'entropia aumenta) e sancisce la natura irreversibile della termodinamica. Per capire dove entri in gioco la costante di Boltzmann e per comprendere meglio il significato dell'entropia, possiamo usare un esempio classico: l'espansione libera di un gas perfetto (vd. fig. b). Consideriamo un contenitore isolato, diviso in due volumi uguali da un setto rimovibile e mettiamo tutto il gas in una delle due parti. Se rimuoviamo il setto, il gas si espanderà fino a occupare l'intero volume. Un semplice calcolo mostra che, come prescritto dal secondo principio della termodinamica, l'entropia del gas aumenta. La sua variazione è proporzionale alla costante di Boltzmann e ha le sue stesse dimensioni fisiche (ossia di un'energia divisa per una temperatura).
Essa, inoltre, dipende dal rapporto tra il volume finale occupato dal gas e quello iniziale, suggerendo che l'entropia misuri in qualche modo lo spazio accessibile alle particelle che lo compongono. Questo aspetto è caratterizzato in modo più preciso e generale nelle definizioni di entropia formulate nel contesto della meccanica statistica.
La meccanica statistica si pone come obiettivo di ricavare le leggi termodinamiche a partire dalle proprietà microscopiche del sistema attraverso una teoria di tipo probabilistico. Quando un sistema macroscopico (composto, ad esempio, da tante molecole) si trova in uno stato di equilibrio, esso in realtà esplora molti stati microscopici (delle singole molecole), tutti coerenti con le variabili termodinamiche misurate. Per esempio, un gas in equilibrio, contenuto in un recipiente isolato, è in uno stato macroscopico definito dal volume che occupa e dalla temperatura, che è una misura del suo contenuto energetico. A parità di volume e temperatura, le molecole che continuano incessantemente a muoversi possono trovarsi in tante configurazioni diverse, che noi non riusciamo a distinguere singolarmente. La meccanica statistica assegna una probabilità a ciascuno di questi microstati. Se vi sono in tutto W microstati con energia e volume dati, l'ipotesi più semplice è che il gas esplori con la stessa probabilità ognuno di essi. In questo caso, l'entropia di Boltzmann è definita da una famosa equazione: $S = k_B \log W$. È proprio in questa definizione, dovuta ai lavori di Boltzmann e formulata da Planck, che la costante di Boltzmann compare per la prima volta. Da questa espressione capiamo quanto intuìto nell'esempio dell'espansione libera, menzionato in precedenza: l'entropia quantifica il numero di microstati accessibili al nostro sistema (la quantità W) e k_B è la costante che traduce questa misura in una grandezza di valenza termodinamica, l'entropia S. Josiah Willard Gibbs successivamente propose un'ulteriore definizione di entropia che generalizza quella di Boltzmann a sistemi con condizioni macroscopiche diverse, in cui le probabilità dei singoli microstati non sono più tutte uguali. Per esempio, consideriamo un gas che non sia isolato, ma in contatto



c.
Nella prima metà del '900 Claude Shannon (in foto) ha sviluppato un concetto alternativo di entropia nel contesto della teoria dell'informazione.

termico con un ambiente esterno. All'equilibrio, il gas avrà un'energia interna ben definita, che possiamo misurare. Tuttavia, nei singoli microstati che esso esplora continuamente l'energia può avere delle piccole fluttuazioni dovute all'interazione con l'esterno, e ognuno di essi avrà una probabilità diversa.
Anche in questo caso, tale probabilità rappresenta l'indeterminazione statistica di uno stato microscopico del sistema. Seguendo la stessa filosofia di Boltzmann, l'entropia introdotta da Gibbs misura il valore medio di questa incertezza. Da questo punto di vista possiamo dunque dire che l'entropia misura la quantità di informazione, necessaria per specificare completamente lo stato microscopico del sistema.
La connessione tra entropia termodinamica e informazione assume un ruolo ancora più importante, se consideriamo un altro concetto di entropia sviluppato nella prima metà del '900 da Claude Shannon proprio nel contesto della teoria dell'informazione. Preso un set di dati, Shannon si chiese quale fosse il modo più conveniente di comprimerli. Egli calcolò dunque il numero minimo di bit informatici necessario per codificare il set di dati, ossia il suo contenuto di informazione. Questa quantità è la cosiddetta "entropia di Shannon".
Se adesso, facendo un parallelismo con quanto discusso precedentemente, consideriamo come set di dati l'insieme dei microstati di un sistema termodinamico, possiamo calcolare su di essi sia l'entropia termodinamica di Gibbs, sia l'entropia di Shannon e vedere quale sia la relazione tra le due. Come intuìto in precedenza, l'entropia di Gibbs risulta essere proporzionale all'informazione contenuta nel sistema, e k_B è la costante che dà a tale quantità di informazione dimensioni termodinamiche. Si trova infatti che alla perdita di 1 bit di informazione corrisponde una variazione di entropia pari a $k_B \log 2$. Partendo da questa osservazione, Rolf Landauer argomentò nel 1961 che, in generale, l'energia minima necessaria per distruggere 1 bit di informazione per un computer che opera alla temperatura T è quantificabile: è proprio pari a $k_B T \log 2$. Questo principio, noto come "principio di Landauer", ha importanti implicazioni nel campo della computazione. I computer operano infatti registrando e distruggendo informazione. Molte operazioni logiche fondamentali, che vengono chiamate "logicamente irreversibili", corrispondono alla cancellazione di informazione. Il principio di Landauer pone dunque un limite teorico minimo all'energia consumata da un computer per il suo funzionamento. La costante di Boltzmann si rivela quindi una chiave fondamentale per comprendere il legame profondo tra entropia, informazione e computazione, con implicazioni che vanno ben oltre lo studio della termodinamica dei sistemi macroscopici.

Biografia
Irene Giardina è professoressa ordinaria in fisica teorica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma, membro dell'Istituto dei Sistemi Complessi del CNR e della sezione INFN di Roma1. Ha una formazione in fisica statistica e ha lavorato per molti anni su sistemi fuori dall'equilibrio in materia condensata e, più recentemente, sulla fisica dei sistemi biologici.
Nel 2021 le è stato conferito, insieme ad Andrea Cavagna, il Delbruck Prize for Biological Physics dell'American Physical Society.

10.23801/asimmetrie.2025.38.5

La carica e suoi derivati

Le costanti dell'interazione elettromagnetica

di Nicolao Fornengo e Alessandro Papa

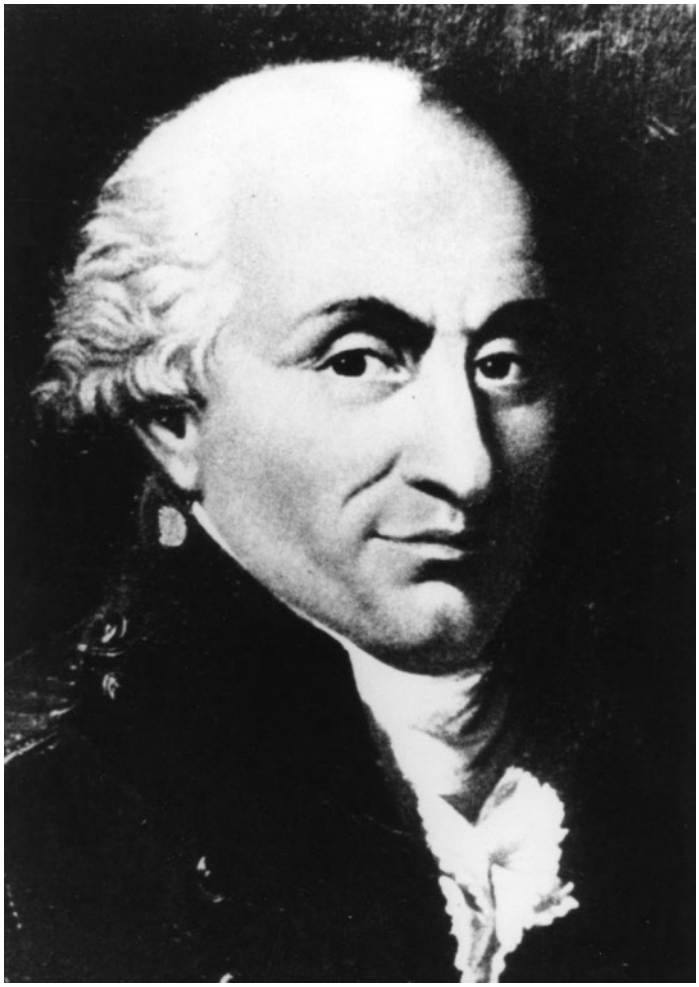
a.
L'elettricità deve il suo nome all'ambra (*elèktron* in greco), la cui proprietà di elettrizzarsi per strofinio era nota sin dall'antichità.

I fenomeni elettrici e magnetici hanno suscitato interesse sin dall'antichità. Sono attribuite a Talete (VII-VI sec. a.C.) le prime osservazioni che sostanze resinose come l'ambra (*elèktron* in greco), se strofinate su vello di pecora, sono in grado di attrarre piume e pagliuzze. Allo stesso Talete, Aristotele attribuisce l'ipotesi che i magneti naturali dovessero la loro proprietà al fatto di possedere un'anima, un'idea rimasta in Europa fino al XVI secolo. In Cina l'osservazione dei fenomeni magnetici aveva portato, verso la fine dell'XI secolo, allo sviluppo della bussola, utilizzata originariamente per individuare la direzione più favorevole lungo cui orientare costruzioni e sepolture. Bisognerà aspettare fino alla fine del XVI secolo per avere i primi studi sistematici sul comportamento dei magneti e sull'elettricità statica generata dall'ambra, da parte di William Gilbert, cui si deve l'invenzione del termine "elettricità", e fino al 1785 per la formulazione da parte di Charles A. de Coulomb della legge che stabilisce che la forza fra due cariche statiche è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della distanza (nota come "legge di Coulomb"). Grazie principalmente alla formidabile opera sperimentale di Michael Faraday e alla mirabile sintesi teorica operata da Maxwell a metà del 1800, si giunge alla definitiva acquisizione del concetto che elettricità e magnetismo sono manifestazione di un'unica interazione, generata da cariche elettriche o da correnti elettriche (ovvero cariche in movimento). Una caratteristica delle cariche elettriche è che il valore della carica di un corpo risulta essere un multiplo intero di una carica fondamentale. Fu Joseph J. Thomson, assieme a John S. Townsend e Harold A. Wilson, a comprendere che i "raggi catodici" (corrente elettrica che fuoriesce da un conduttore di carica negativa, il "catodo", e che, propagandosi in un tubo a vuoto, raggiunge un altro conduttore positivo, l'"anodo") sono composti da particelle singole. Thomson fu anche in grado di determinare che il rapporto tra la carica elettrica dei singoli portatori e la loro massa era costante, mostrando che la corrente elettrica era trasportata da corpuscoli elementari, che furono chiamati elettroni. La carica dell'elettrone fu misurata con precisione da Robert Millikan e Harvey Fletcher nel 1909 con un esperimento in cui venivano fatte cadere goccioline di olio elettricamente cariche all'interno di un condensatore:

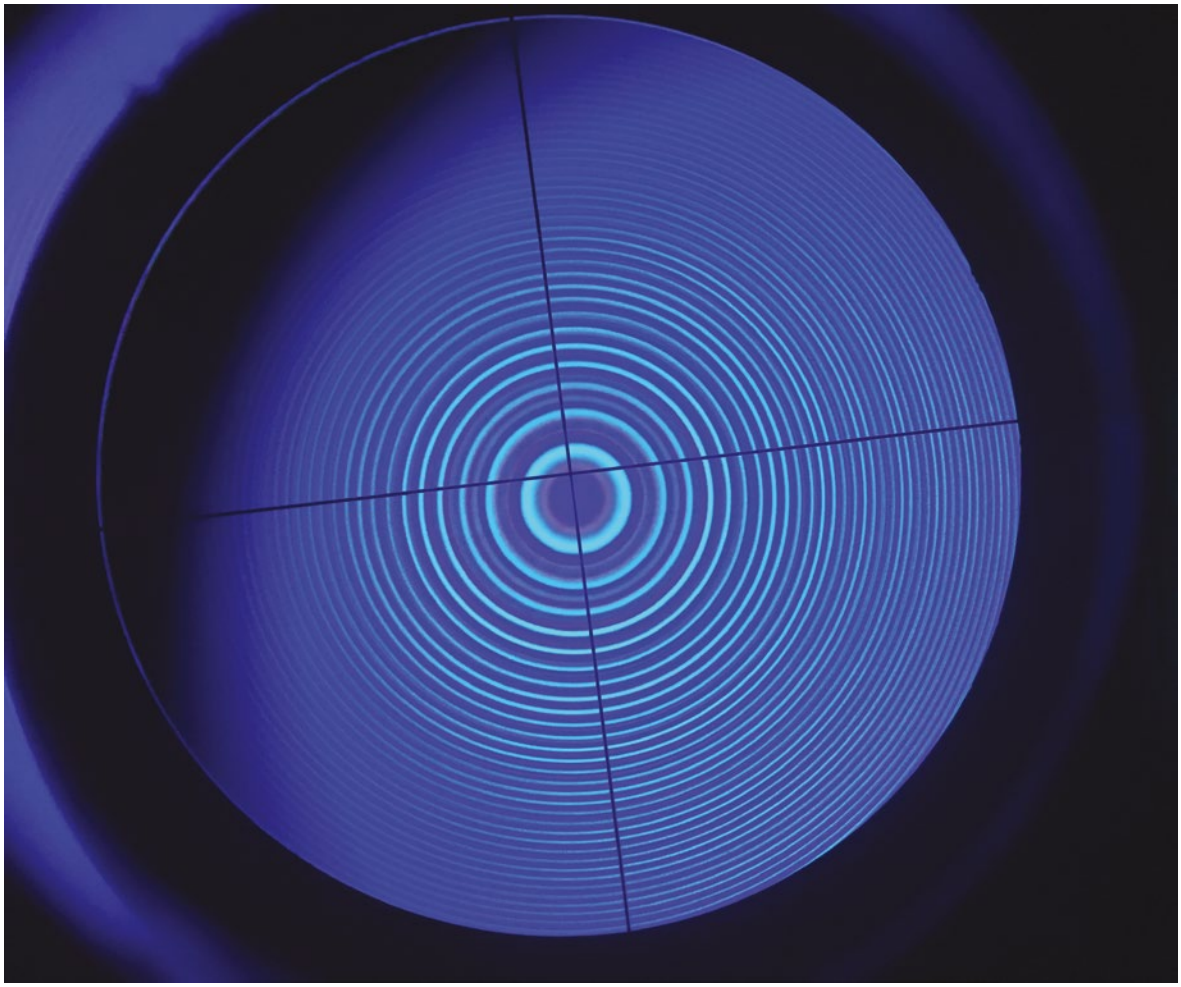
il campo elettrico del condensatore manteneva in equilibrio a mezz'aria le goccioline, che altrimenti sarebbero cadute a causa della forza di gravità.
Grazie a questo equilibrio tra la forza elettrica (dovuta alla carica) e la forza gravitazionale (sensibile alla massa), fu possibile determinare con precisione la carica elettrica delle goccioline: il risultato fu che ogni carica era un multiplo intero di un valore specifico pari a circa $1{,}6\times10^{-19}$ Coulomb. Questa era quindi la carica elettrica del portatore fondamentale, ovvero dell'elettrone. La carica dell'elettrone è per definizione negativa, ma il fatto che l'atomo di idrogeno, formato da un protone e un elettrone, sia elettricamente neutro, ci fa capire come anche il protone sia dotato di una carica in valore uguale a quella dell'elettrone, ma di segno opposto, ovvero positiva. La carica elettrica fondamentale (positiva), oggi chiamata *e*, si riferisce proprio a questo valore $1{,}60217663\times10^{-19}$ Coulomb: ogni particella o corpo carico ha poi una carica che è un multiplo intero di questo valore, e un segno che può essere positivo o negativo. L'interazione tra cariche elettriche può essere sia attrattiva che repulsiva: il primo caso avviene quando le due cariche hanno segno opposto, il secondo caso quando hanno lo stesso segno. La carica *e* rappresenta quindi una costante universale. A metà degli anni '60 del secolo scorso Murray Gell-Mann e George Zweig proposero che particelle dotate dell'interazione forte, come il protone e il neutrone, fossero a loro volta costituite da particelle ancora più fondamentali: i quark. Dato che protone e neutrone hanno carica intera (in termini di *e*, carica +1 il protone e 0 il neutrone) e sono composti da tre quark, questi ultimi devono necessariamente avere carica frazionaria, pari a 2/3*e* per il quark up e -1/3*e* per il quark down. Questa fu un'ipotesi rivoluzionaria e fu confermata alla fine degli anni '60 dagli esperimenti di diffusione profondamente anelastica realizzati allo Stanford Linear Accelerator Center (vd. Asimmetrie n. 16, ndr). Le particelle con carica frazionaria non sono direttamente osservabili: solo combinazioni di quark dotate di carica intera, come protone e neutrone, possono essere osservate direttamente.
Combinando la carica *e* con altre costanti fondamentali, è possibile definire l'intensità dell'interazione elettromagnetica in termini di una quantità che non ha dimensioni, cioè è un numero puro: la "costante di struttura fine" α (ovvero la costante di accoppiamento dell'interazione elettromagnetica), definita come $\alpha = e^2 / 4\pi\varepsilon_0\hbar c$, dove *c* è la velocità della luce nel vuoto (vd. p. 11, ndr), $\hbar$ la costante di Planck ridotta (vd. p. 14, ndr) e ε_0 la costante dielettrica del vuoto, una quantità che misura quanto è intenso il campo elettrico che si forma nel vuoto in risposta alla presenza di cariche elettriche e compare nella legge di Coulomb. Il valore di α corrisponde a 1/137,035999177 = 0,007297352564.
Altri esempi di costanti adimensionali sono le costanti di accoppiamento analoghe a α per le interazioni debole e forte (α_W e α_s). Possiamo definire una quantità analoga ad α anche per l'interazione gravitazionale: $\alpha_G = Gm_e^2/\hbar c$ (dove m_e è la massa degli elettroni), il cui valore, dell'ordine di 10^{-45}, è molto più piccolo di quello di α, mostrando così in modo alquanto evidente come l'interazione gravitazionale tra due particelle (in questo caso elettroni) sia estremamente più debole dell'interazione elettromagnetica.

b.
L'apparato con cui Millikan e Fletcher misurarono la carica dell'elettrone nel 1909.

Il fatto che si possa esprimere l'intensità di una interazione con un numero puro, che non ha bisogno di unità di misura, è particolarmente suggestivo. Infatti, l'importanza di una costante fondamentale adimensionale risiede nel fatto che se le costanti (dimensionali), che partecipano a definirla, avessero valori differenti da quelli che misuriamo, ma tali da mantenere fisso il valore della costante adimensionale, quell'universo sarebbe indistinguibile dal nostro dal punto di vista osservativo.
Ma la costante di struttura fine α e i suoi analoghi per le interazioni debole e forte sono veramente costanti? Lo sarebbero secondo la meccanica classica o la meccanica quantistica, ma secondo la teoria quantistica dei campi, che è la teoria corretta per la descrizione del modello standard, il loro valore non è costante e dipende dall'energia del processo.
Il fenomeno responsabile di questo effetto nella teoria elettromagnetica è chiamato "polarizzazione del vuoto".
Siccome il vuoto quantistico è un ribollire di coppie virtuali di elettroni-positroni (vd. p. 9 in Asimmetrie n. 37, ndr), esso si comporta come un materiale dielettrico: un elettrone (reale) immerso nel vuoto lo polarizza, attraendo a sé i positroni e respingendo gli elettroni virtuali, con il risultato che la sua carica viene di fatto schermata. Questo effetto di schermatura è tanto più pronunciato quanto più da lontano si osserva l'elettrone: a grandi distanze (o a basse velocità, secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg) l'elettrone appare "meno carico", a piccole distanze (o a grandi velocità) esso appare "più carico". Da qui il *running* della carica elettrica e, quindi, della costante di struttura fine α. In questo scenario, 1/137,035999177 va inteso come il valore di α a bassa energia o più precisamente a energie dell'ordine della massa dell'elettrone (pari a circa 0,5 MeV/c^2). Al crescere dell'energia, α cresce (debolmente), raggiungendo il valore di circa 1/128 per una energia corrispondente alla massa del bosone Z^0.
Il *running* delle costanti di accoppiamento si verifica anche per le interazioni debole e forte, con la differenza che, per quest'ultima, esso avviene in modo opposto rispetto al caso elettromagnetico: con l'aumentare dell'energia, la costante di accoppiamento forte diminuisce, con il risultato che alle corte distanze quark e gluoni appaiono come particelle quasi-libere ("libertà asintotica").
È interessante osservare che i valori delle costanti di accoppiamento elettromagnetica, debole e forte convergono al crescere dell'energia (vd. fig. c a p. 7, ndr) verso un valore unico comune, a una qualche scala energetica molto alta. Questa scala è detta "di grande unificazione", perché da quella energia in su le tre interazioni sono di fatto un'unica interazione, che a energie più basse ci appare in tre manifestazioni diverse.
Come si misura oggi la costante di struttura fine α? In altri termini, qual è la versione moderna dell'esperimento di Millikan e Fletcher? Un modo per rispondere a queste domande fa entrare in scena il "fattore giromagnetico" g_e dell'elettrone, una grandezza che stabilisce la forza con cui un elettrone interagisce con un campo magnetico. Secondo la meccanica quantistica relativistica, formulata da Dirac nel 1928, il valore di g_e sarebbe esattamente 2, ma sempre la teoria quantistica dei campi prevede che il valore devii di una piccola quantità, il cui contributo dominante è proporzionale proprio ad α. Le misure più accurate della deviazione da 2 del fattore giromagnetico



c.
Un ritratto di Charles Augustin de Coulomb, vissuto in Francia a cavallo del XVII secolo.



d.
La costante di struttura fine α è responsabile della separazione "fine" tra le linee spettrali di emissione degli atomi, visibili, ad esempio, mediante un interferometro Fabry-Pérot, come mostra l'immagine.

permettono di determinare il valore di g_e con una precisione inferiore a una parte su 10 miliardi. Altre tecniche invece utilizzano l'interferometria atomica con atomi di cesio, in cui si sfruttano le proprietà quantistiche della materia (caratteristica ondulatoria): le "onde di materia" sono controllate e manipolate utilizzando sistemi di laser, e analogamente a un esperimento in cui si fa interferire la luce, qui viene misurata la differenza di fase quantistica tra le onde di materia atomica lungo percorsi diversi. Anche in questo caso, si ottengono precisioni vicine a una parte su 10 miliardi.

Se da un lato oggi conosciamo il valore di α con enorme accuratezza, sono ancora molte le domande a cui non sappiamo rispondere: cosa determina quel particolare valore di α? Il valore di α è sempre stato lo stesso nell'evoluzione dell'universo? Perché (oggi) la carica elettrica si manifesta unicamente come multiplo di *e*, con la sola eccezione delle cariche dei quark che invece sono multiple di un terzo di *e*? Per rispondere a queste domande bisogna varcare la frontiera delle nostre conoscenze delle interazioni fondamentali: un viaggio senza dubbio elettrizzante…

Biografie
Nicolao Fornengo è fisico teorico e docente di meccanica quantistica e di relatività generale presso l'Università di Torino. Ha svolto le sue ricerche, oltre che in Italia, negli Stati Uniti (Johns Hopkins University) e Spagna (Università di Valencia/IFIC) e, per brevi periodi, in Francia (LAPth, Annecy). Si occupa di fisica astroparticellare e cosmologia, con particolare interesse al problema della materia oscura.

Alessandro Papa è docente di meccanica quantistica e teoria quantistica dei campi presso l'Università della Calabria. Fisico teorico con incarico di ricerca INFN, ha lavorato anche in Svizzera (ITP, Berna) e si occupa principalmente di interazioni forti, che studia sia mediante simulazioni numeriche su reticolo spazio-temporale, sia con tecniche perturbative nel regime di alta energia.

10.23801/asimmetrie.2025.38.6

L'errore geniale

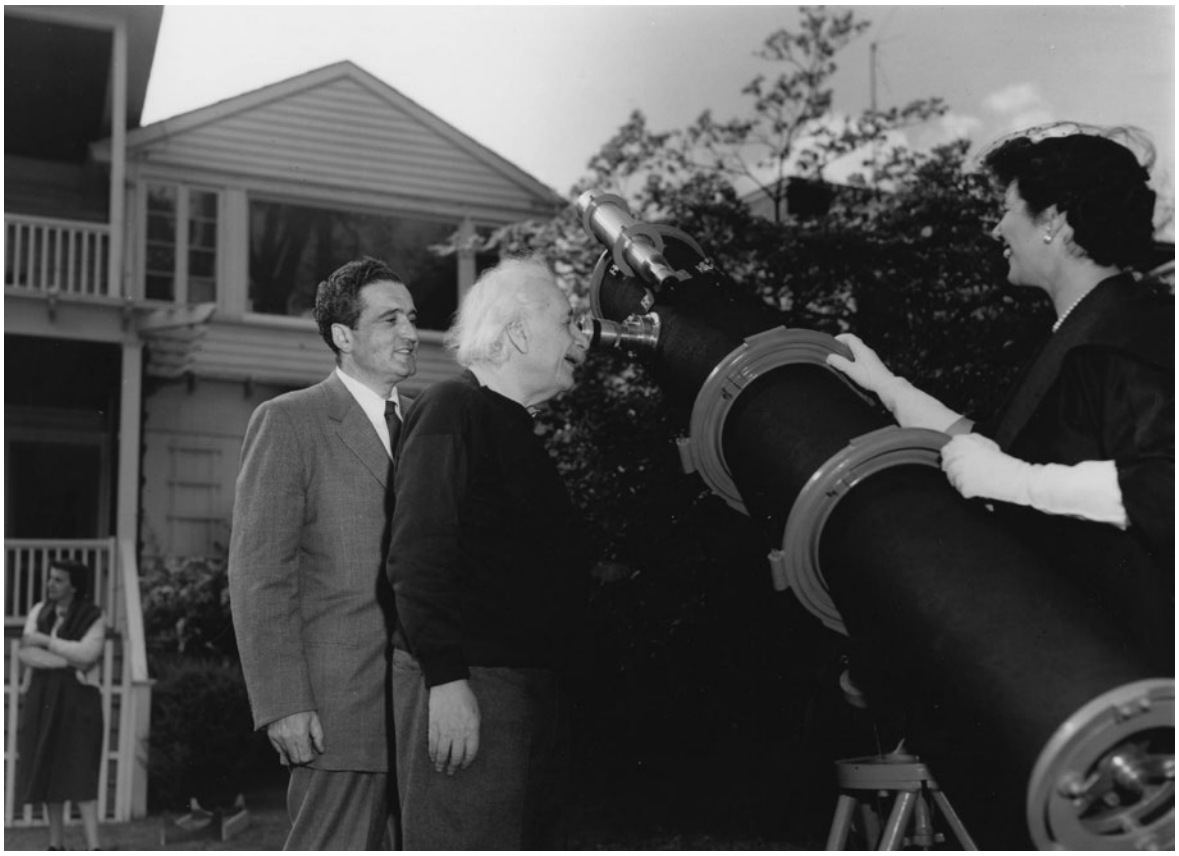
La costante cosmologica

di Stefano Camera

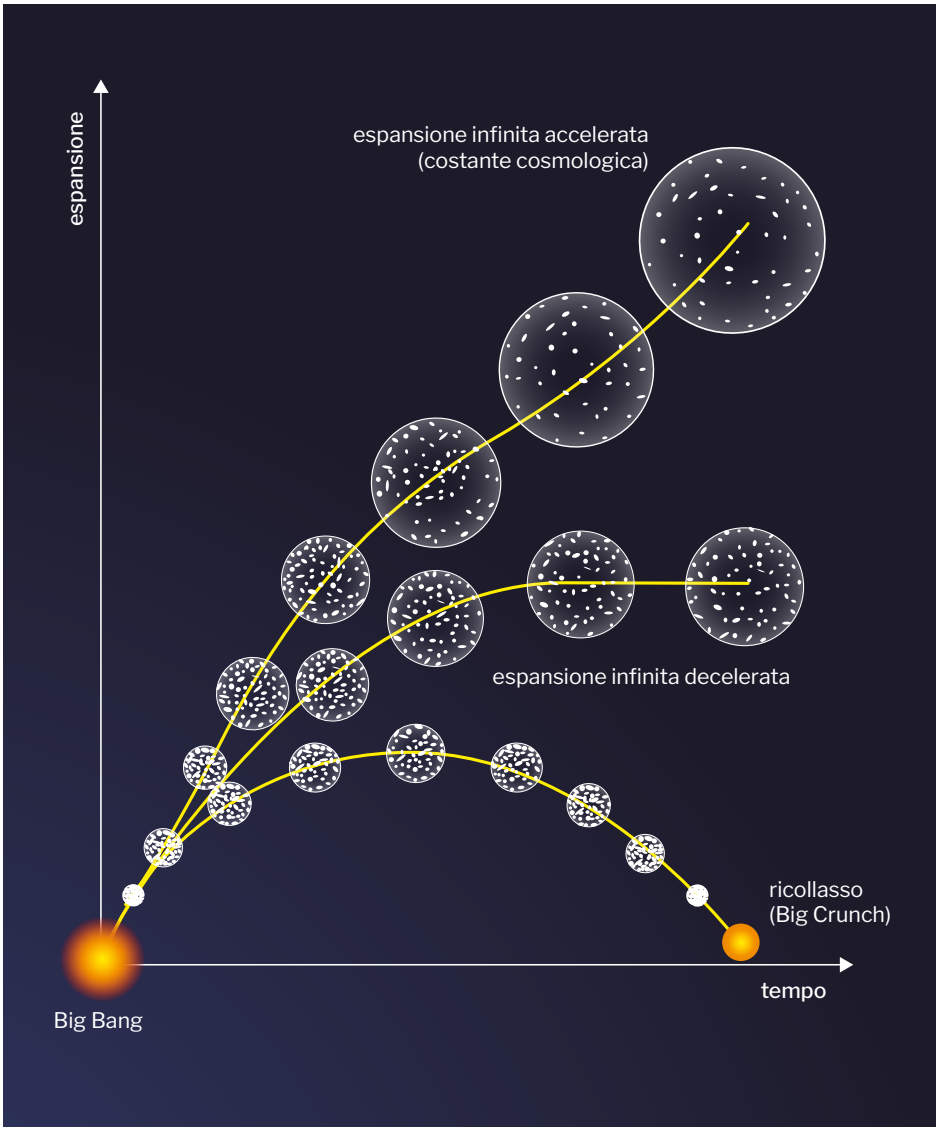
Quando parliamo di "costante cosmologica" (Λ), entriamo – non c'è bisogno di dirlo – nell'ambito di competenza della cosmologia. La cosmologia è quella branca della fisica che si occupa di studiare l'universo come sistema fisico, con le sue proprietà e la sua evoluzione, al di là dei singoli processi astrofisici che vi avvengono all'interno. Al giorno d'oggi, la cosmologia è a tutti gli effetti una scienza di precisione, con misure dei suoi parametri fondamentali che arrivano a un'incertezza anche inferiore al percento e un "modello cosmologico standard" in grado di interpolare i dati a nostra disposizione meglio di qualsiasi altra alternativa sul mercato.
La storia della cosmologia come disciplina scientifica, però, è piuttosto recente: la cosmologia fisica nasce solo all'inizio del XX secolo, grazie alla teoria generale della relatività di Einstein e alle rivoluzionarie osservazioni astronomiche dell'epoca.
La teoria generale della relatività, o più semplicemente relatività generale, rappresenta tuttora la più accurata descrizione in nostro possesso dell'interazione gravitazionale (in altre parole, della forza di gravità). La relatività generale descrive lo spazio e il tempo come indissolubilmente interconnessi, un *continuum* che prende per l'appunto il nome di spaziotempo. Contrariamente alla visione newtoniana e kantiana di spazio quale immutabile "contenitore" e tempo quale eterno "scorrere", lo spaziotempo einsteiniano non è indipendente dal suo contenuto e il suo comportamento si può riassumere parafrasando la fortunata massima del relativista John A. Wheeler: "Lo spaziotempo spiega alla materia come muoversi, la materia spiega allo spaziotempo come incurvarsi".
Tra le innumerevoli conseguenze della relatività generale, già alla fine degli anni '10 del '900 ci si rese conto che la teoria di Einstein, se applicata alla descrizione dell'universo, restituiva un quadro in cui quest'ultimo non poteva essere statico ma doveva necessariamente evolversi e – ancor più sorprendentemente – aver avuto un inizio nonché, forse, una fine. L'idea di un universo non sempre uguale a se stesso era talmente rivoluzionaria da risultare aliena persino allo stesso Einstein, il quale tornò sui suoi passi e rivide la sua teoria introducendo un (perfettamente lecito) artificio matematico, oggi conosciuto appunto come "costante cosmologica". Il suo scopo era esattamente quello di ripristinare la plausibilità di una descrizione statica dell'universo.
In termini tecnici, le equazioni che governano il campo

a.
Foto di John A. Wheeler, fisico statunitense e direttore del Center for Theoretical Physics dell'Università del Texas dal 1976 al 1986, noto per i suoi studi sulle equazioni di campo della relatività generale.

gravitazionale nella descrizione relativistica, in analogia con il corrispettivo classico della gravitazione newtoniana, rispondono a leggi di conservazione. In fisica classica, quando si parla di "conservazione" si intende che una certa quantità non cambia nel tempo. Nel caso relativistico, invece, essendo tempo e spazio non più due concetti indipendenti bensì diverse sfaccettature di un *continuum* spaziotemporale, "conservazione" implica più genericamente che la quantità in gioco non dipende dalla scelta del sistema di riferimento né dallo stato di moto di un osservatore. La costante cosmologica, in quanto costante, è di fatto quel numero che può essere aggiunto alle equazioni mantenendone le proprietà di conservazione. La sua presenza, però, è tutt'altro che ininfluente, in quanto può essere scelta in maniera tale da cancellare esattamente la dipendenza dal tempo delle proprietà dell'universo, rendendolo statico esattamente come voleva Einstein.
Come spesso accade, però, le cose non vanno in un certo modo semplicemente perché lo vogliamo e la costante cosmologica introdotta da Einstein dovette presto essere scartata, apostrofata dal suo stesso creatore come "Il mio più grande errore". Infatti, nel 1927, George Lemaître (e lo stesso Edwin Hubble due anni più tardi) mostrò che le galassie non stanno ferme, ma si muovono coerentemente allontanandosi le une dalle altre, per di più a velocità tanto più elevate quanto maggiore è la distanza tra loro. Queste e altre successive osservazioni hanno portato alla formulazione della teoria del Big Bang, secondo la quale l'universo si sarebbe formato a partire da uno stato iniziale di altissima densità e temperatura, cui sarebbe seguita una rapida espansione.
Ma questa non è la fine della storia… Con il progresso delle osservazioni astronomiche e cosmologiche, verso la fine del '900 è diventato chiaro come il cosmo non solo si stia espandendo, ma al di là di ogni ragionevole dubbio stia attraversando una fase di espansione accelerata! Qui il punto esclamativo è d'obbligo, perché se l'interpretazione delle osservazioni è corretta, questo fenomeno non ha paragoni nella storia della fisica. Infatti, se l'universo è governato dalla gravità – una forza attrattiva – questa agirà naturalmente in opposizione all'espansione, facendo sì che la sua velocità vada via via diminuendo cioè, che l'universo si espanda rallentando. A questo punto, si possono immaginare due scenari: se c'è sufficiente materia ed energia nell'universo da far sì che la



b.
Albert Einstein e Zvi Gezari conversano nel cortile della casa di Einstein a Princeton. In primo piano il telescopio costruito da Gezari per Einstein, successivamente donato, a suo nome, al Ben Shemen Youth Village in Israele.



c.
Modelli di espansione dell'universo, che mostrano l'aumento della distanza tra due punti al passare del tempo, a partire dall'istante del Big Bang. Se l'universo contiene una quantità sufficiente di materia, a una prima fase di espansione segue un collasso che si conclude con il Big Crunch, in cui la densità torna a essere infinita come all'istante del Big Bang. Se invece la quantità di materia è inferiore, l'universo continua a espandersi per sempre, seppur in modo sempre più lento (espansione decelerata). Se invece è presente la costante cosmologica, l'universo continua a espandersi per sempre e a un certo punto la costante cosmologica prende il sopravvento e determina un'espansione sempre più rapida (espansione accelerata).

forza di gravità da essa e su se stessa esercitata sia sufficiente a fermare del tutto l'espansione, l'universo, una volta esaurita del tutto la "spinta", inizierà a contrarsi andando incontro a quello che viene colloquialmente denominato Big Crunch; altrimenti, se la forza di gravità complessiva generata da tutta la materia ed energia presente nell'universo non è sufficiente a fermarne del tutto l'espansione, questa continuerà all'infinito (asintoticamente), rallentando sempre di più. Ma in nessun caso è prevedibile un'espansione accelerata. A questo punto, entriamo nell'ambito delle ipotesi. I dati attualmente in nostro possesso possono venire spiegati se si ammette l'esistenza di una forma di energia sconosciuta – cui è stato dato l'evocativo nome di "energia oscura" – che permea il cosmo con una densità costante. Si tratta di nient'altro che della costante cosmologica di Einstein. In altre parole, seppur lo spazio si espanda, la densità di energia oscura rimane sempre la stessa, al contrario di ciò che accade alla materia, per la quale la densità diminuisce in maniera direttamente proporzionale all'aumentare del volume. Ora, la teoria generale della relatività di Einstein ci spiega come il tasso di espansione dell'universo sia proporzionale al suo contenuto. Pertanto, se nel cosmo ci fosse solo materia, all'aumentare del volume la densità di materia diminuirebbe e, di conseguenza, anche il tasso di espansione, con il risultato netto di un'espansione decelerata, come descritto poc'anzi. Al contrario, un tasso di espansione costante implica che il cosmo impiega una determinata, costante quantità di tempo per raddoppiare la sua dimensione. Dal nostro punto di vista questo corrisponde a vedere le galassie intorno a noi allontanarsi tanto più rapidamente quanto più sono lontane, in moto accelerato rispetto a noi.

Biografia
Stefano Camera si occupa di cosmologia, in particolare dello studio della struttura cosmica su grande scala. Fa parte di numerose collaborazioni internazionali, tra cui il consorzio del satellite Euclid e dell'Osservatorio SKA. Dal 2020 è professore presso l'Università degli Studi di Torino e *visiting professor* presso la University of the Western Cape (Sudafrica).

10.23801/asimmetrie.2025.38.7

Andante, ma non troppo

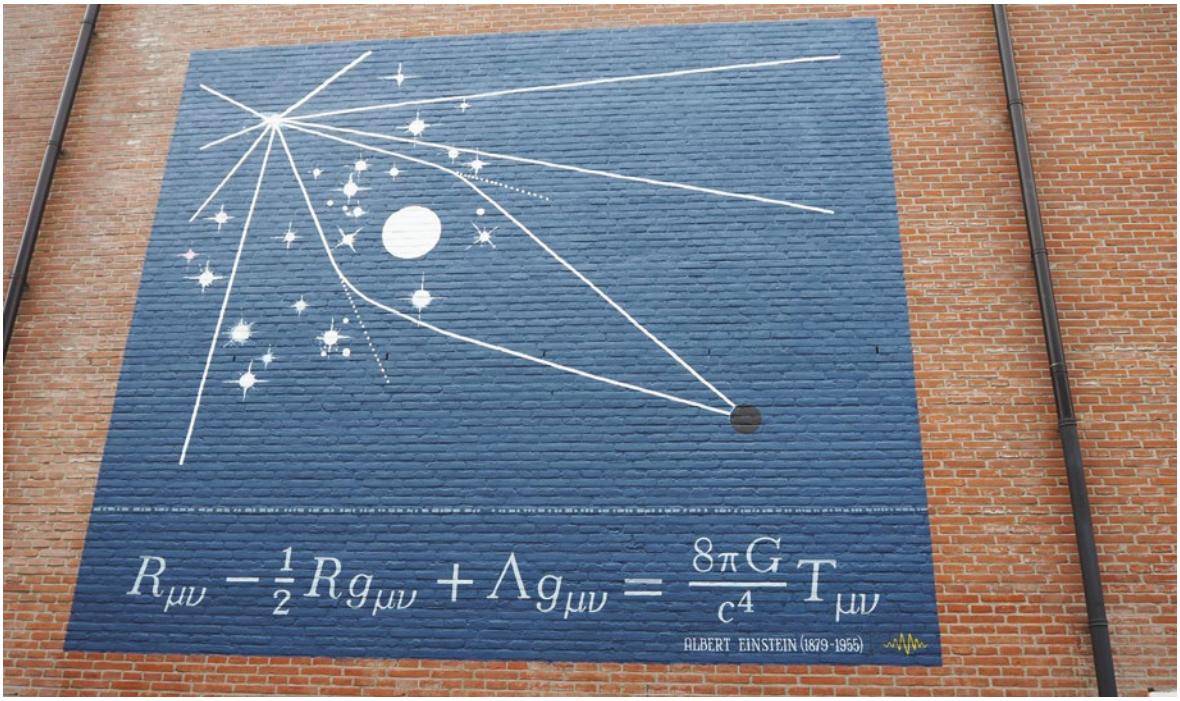
Variazioni delle costanti fondamentali

di Alessandra Silvestri

a.
Il Quintetto di Stephan, il primo gruppo di galassie mai scoperto, situato nella costellazione di Pegaso. Questa immagine, catturata dal telescopio spaziale James Webb, è la più dettagliata realizzata fino ad oggi e copre un'area pari a un quinto del diametro della Luna. Lo studio di gruppi galattici come questo aiuta gli scienziati a comprendere come le interazioni tra galassie abbiano influenzato l'evoluzione dell'universo primordiale.

Il cielo notturno ha affascinato le civiltà fin dall'antichità, ma solo dopo la rivoluzionaria teoria della relatività generale siamo stati in grado di studiare il contenuto e l'evoluzione dell'universo con il metodo scientifico. Quando Albert Einstein formulò la sua teoria della gravità nel 1915, promosse lo spaziotempo quadridimensionale, introdotto nella relatività speciale, a entità dinamica e la gravità divenne semplicemente la manifestazione della geometria e della dinamica dello spaziotempo!
Il tempo e lo spazio divennero essi stessi attori del dramma cosmico secondo regole precise dettate dalla teoria di Einstein. Ciò ha aperto la strada a una nuova disciplina, la "cosmologia fisica", che ha aperto agli scienziati la porta delle meraviglie del cosmo.

Come con la relatività speciale Einstein ci ha detto che energia e massa sono due facce della stessa entità, così con la relatività generale ci ha spiegato che la geometria dello spaziotempo determina il modo in cui la materia scorre e che, viceversa, la materia dice allo spaziotempo come comportarsi. Questo è codificato nella famosa equazione di Einstein che è la pietra miliare della cosmologia (vd. fig. b). Il linguaggio con cui descrivere la gravità è diventato più complicato rispetto alla teoria di Newton, ma per il nostro scopo è sufficiente dire che sul lato sinistro dell'equazione abbiamo la descrizione della geometria dello spaziotempo, mentre sul lato destro abbiamo l'energia e la quantità di moto di ciò che compone l'universo. La forma e l'evoluzione dello spaziotempo sono determinati dalla densità di



b.
In foto, l'equazione di campo di Einstein che descrive come la massa e l'energia deformano lo spaziotempo, influenzando la gravità. Il murales è stato realizzato a Leiden nell'ambito del progetto Wall Formula della Tegen-Beeld Foundation, un'iniziativa che rende accessibili concetti scientifici complessi attraverso opere pubbliche.

massa/energia, dalla pressione e dal flusso di quantità di moto della materia che riempie l'universo (barioni, fotoni, neutrini, materia oscura, ecc.).
La prima conferma sperimentale di questa equazione su scala cosmologica si ebbe grazie a Lemaître e Hubble, i quali indipendentemente osservarono che le galassie lontane si allontanavano da noi con una velocità proporzionale alla loro distanza: esattamente ciò che l'equazione di Einstein impone per le galassie che si trovano in un universo omogeneo (uguale in ogni punto) e isotropo (uguale intorno a ogni punto), che si espande.
Soffermiamoci su un aspetto di questa equazione: la costante *G*, nota anche come costante di Newton (vd. p. 17, ndr). Si tratta infatti della stessa costante della legge di gravità universale di Newton, ovvero la costante di proporzionalità che collega la forza gravitazionale tra due corpi con il prodotto delle loro masse e l'inverso del quadrato della loro distanza. In effetti, la gravità newtoniana può essere recuperata, nel giusto limite, dall'equazione di Einstein. Nelle equazioni di campo di Einstein, *G* quantifica la relazione tra la geometria dello spaziotempo e il tensore energia-impulso della materia. Alle scale molto grandi, dove l'universo appare omogeneo e isotropo, possiamo determinare il tasso di espansione dell'universo dalla densità di materia che lo popola, attraverso questa costante di proporzionalità *G*.
Nel contesto originale della relatività generale *G* è una costante universale, e questa proprietà è legata in modo abbastanza intrinseco a molti dei principi alla base della teoria. Quali sono i fondamenti della formulazione di Einstein della relatività generale? Primo fra tutti, il "principio di equivalenza debole", noto anche come "universalità della caduta libera". Ma ce ne sono altri due: l'invarianza di Lorentz e l'invarianza di posizione locale. L'ultimo afferma che il risultato di qualsiasi esperimento locale non gravitazionale è indipendente dal luogo e dal momento nell'universo in cui viene eseguito. In altre parole, i vari parametri che descrivono queste forze non gravitazionali, come la costante di struttura fine, sono indipendenti dallo spazio e dal tempo: delle vere e proprie costanti! Ci soffermiamo ora su questo ultimo aspetto ed esploriamo la possibilità che invece le costanti varino. Uno scenario in cui questo può avvenire in modo abbastanza naturale è quello delle teorie di gravità modificata per le quali *G* non è una costante.
Ma perché considerare modifiche alla relatività generale?
Abbiamo sicuramente testato e confermato la relatività generale nella sua formulazione originale con un'elevata precisione nel Sistema Solare e intorno a oggetti compatti (ad esempio le stelle di neutroni). Ma certamente non lo abbiamo ancora fatto sulle scale molto grandi che caratterizzano l'universo nel suo complesso. Inoltre, alcuni dei misteri di lunga data del cosmo, come l'accelerazione cosmica e la natura della materia oscura, ci potrebbero costringere a mettere in dubbio la validità

c.
A sinistra, Robert H. Dicke e, a destra, Karl H. Brans, noti per l'omonima teoria formulata nel 1961. La loro formulazione suggerisce che la costante gravitazionale *G* possa variare nello spazio e nel tempo, diversamente da quanto previsto dalla relatività generale.

della relatività generale su scale cosmologiche. Teorie alternative della gravità sono state esplorate a partire da molto tempo. Nel contesto di questo articolo, citeremo il lavoro di Pascual Jordan del 1959 e di Karl H. Brans e Robert H. Dicke del 1961, che esplorarono, introducendo una costante di Newton variabile nello spazio e nel tempo, la formulazione di una teoria relativistica della gravità che contenesse il "principio di Mach" (un'idea originariamente attribuita al fisico e filosofo Ernst Mach, secondo la quale la massa inerziale è influenzata dalla distribuzione globale di materia). Questo ha portato all'interessante classe di teorie della gravità oggi note come Jordan-Brans-Dicke, che aggiungono alla consueta interazione gravitazionale una quinta forza mediata da una particella scalare, il cui effetto è proprio quello di determinare una variazione nel tempo della costante *G*. Questa variazione permette per esempio di modificare la relazione fra il tasso di espansione dell'universo e la densità della materia che lo popola, così da fornire una spiegazione naturale all'accelerazione cosmica. Se poi andiamo a guardare le proprietà delle particelle di materia in queste teorie, troviamo che la loro massa dipende anche dal tempo. E non appena guardiamo oltre al semplice universo omogeneo e isotropo, in queste teorie *G* acquisisce anche una dipendenza dallo spazio. Di conseguenza, le masse delle particelle e, con opportune generalizzazioni, anche le costanti di accoppiamento possono variare nello spazio e nel tempo nelle teorie cosiddette "scalari-tensoriali".
La variazione delle costanti di accoppiamento è stata studiata con molti esperimenti, che hanno posto limiti molto forti alla possibilità che le costanti fondamentali possano cambiare nello spazio e nel tempo.
Immaginate un universo in cui, in momenti diversi della sua storia e in luoghi diversi, le masse e le costanti di accoppiamento delle particelle fossero diverse. Sembrerebbe un universo molto strano, che metterebbe in discussione la maggior parte delle nostre solide conoscenze della fisica: il modello standard della fisica delle particelle funzionerebbe ancora nel modo in cui lo conosciamo? Evoca uno scenario da film di fantascienza, eppure ci sono dei margini entro i quali questo potrebbe accadere ed essere ancora compatibile con tutto ciò che abbiamo misurato finora.
A livello locale, un vincolo molto stringente sulla variazione temporale della costante di struttura fine è stato posto da misure geofisiche come quelle del reattore nucleare di Oklo e da dati meteoritici. Vincoli sulle loro variazioni spaziali sono stati invece posti dall'esperimento di Vessot-Levine (Gravity Probe A), che ha misurato il *redshift* tra un orologio basato su un maser a idrogeno volato a 10^4 km di altezza e un altro a terra.
A livello cosmologico, sono già stati posti alcuni limiti alla variazione delle costanti di accoppiamento, spesso concentrandosi anche in questo caso sulla costante di struttura fine. Il

d.
In foto il telescopio DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument), situato al Kitt Peak National Observatory in Arizona, progettato per mappare l'universo e studiare l'energia oscura. Nel 2024, ha utilizzato un campione di circa 110.000 galassie per misurare la possibile variazione della costante di struttura fine nello spazio e nel tempo. Questo studio, che si basa su spettroscopie delle galassie a emissione di linea, mira a verificare se la costante, che regola le interazioni elettromagnetiche, vari tra diverse epoche cosmiche.

fondo cosmico a microonde, generato ca. 340.000 anni dopo il Big Bang, sonda il valore della costante di struttura fine a quell'epoca e, come tale, fornisce finora il limite più stringente sulla sua variazione temporale. Andando ancora più indietro nel passato, troviamo la nucleosintesi del Big Bang, durante la quale si è formata la maggior parte dell'elio nell'universo, insieme a deuterio e litio. Osservando oggi le abbondanze di questi elementi, i cosmologi possono porre dei limiti alle reazioni avvenute allora, vincolando anche i valori delle costanti di accoppiamento dei processi deboli. Complessivamente, gli attuali vincoli cosmologici pongono limiti che, a seconda della costante, si collocano tra l'1% e il 10%. È interessante notare che alcune recenti analisi sulle linee di assorbimento dei quasar hanno indicato che la costante di struttura fine potrebbe essersi evoluta di più di una parte su 10^5 nell'intervallo del redshift cosmologico $0{,}2<z<3{,}7$. Analisi più recenti su quasar provenienti da una regione diversa, tuttavia, sembrano indicare una tendenza opposta. Molto recentemente, nel 2024, l'esperimento DESI ha utilizzato circa 110.000 galassie con linee di emissione forti e strette per misurare la variazione relativa della costante di struttura fine nello spazio e nel tempo, ponendo limiti dell'ordine di una parte su un milione. Come spesso accade, tutti questi risultati devono essere considerati con attenzione rispetto a ogni possibile effetto sistematico. Siamo ormai entrati nell'era della cosmologia di precisione, con il dispiegamento di una serie di missioni cosmologiche che mapperanno miliardi di galassie, la loro forma e posizione, su un volume impressionante intorno a noi, coprendo fino al 75% della storia dell'universo. Fra queste la missione europea Euclid, guidata dall'ESA e lanciata nel luglio 2023. Tra le altre cose, queste missioni forniranno nuovi e più stringenti vincoli sulla variazione delle costanti, fino a escludere qualsiasi variazione o a rilevarne potenzialmente una piccola, aprendo così nuove entusiasmanti strade per l'esplorazione della fisica fondamentale.

Biografia
Alessandra Silvestri ha studiato fisica teorica all'Università di Trieste e ha conseguito un dottorato in cosmologia alla Syracuse University, USA. Dopo un postdoc di quattro anni al MIT e due anni come *excellence fellow* alla SISSA, è professoressa all'Istituto Lorentz per la Fisica Teorica all'Università di Leiden dal 2015.

10.23801/asimmetrie.2025.38.8

[as] radici

Tra meccanica e termodinamica

di Giovanni Battimelli

Gli atomi e le molecole esistono davvero, o sono solo una utile finzione per spiegare le proporzioni fisse con cui si combinano i vari elementi nelle reazioni chimiche? E se a livello microscopico la materia è davvero costituita da mattoncini discreti, è possibile ridurre le leggi empiriche della termodinamica a una spiegazione più profonda, basata sulle leggi della meccanica che regolano il moto molecolare? Sono tra le domande principali che agitano il panorama, teorico e sperimentale, della fisica della seconda metà dell'800. Quando nel 1866 Boltzmann pubblica il suo primo lavoro sull'argomento, la teoria cinetica dei gas ha già ottenuto alcuni primi incoraggianti risultati. L'anno prima, Clausius ha ricavato l'espressione che lega la temperatura di un gas all'energia cinetica delle sue molecole e, nello stesso anno 1866, James Clerk Maxwell ricava, facendo ricorso a semplici assunzioni probabilistiche, la legge di distribuzione delle velocità molecolari per un gas all'equilibrio termodinamico.
In tutte queste relazioni compaiono delle costanti, il cui valore resta indefinito, data l'incertezza con cui sono stimate all'epoca grandezze come la massa e le dimensioni degli oggetti microscopici o il numero di Avogadro (vd. p. 36, ndr). Comunque, la prospettiva di dare del primo principio della termodinamica una interpretazione puramente meccanica sembra ben stabilita: la legge generale di conservazione dell'energia, nelle sue varie forme, si riduce al teorema di conservazione dell'energia meccanica in un insieme isolato di punti materiali interagenti.
Più problematico appare il compito di fornire analoga interpretazione meccanica del secondo principio della termodinamica, quello appena condensato da Clausius nell'asserzione che un sistema isolato evolve irreversibilmente verso uno stato finale di equilibrio attraversando stati caratterizzati da valori sempre crescenti dell'entropia. È il compito cui si accinge Boltzmann, e che crede di aver risolto in un monumentale lavoro del 1872 sulla teoria cinetica dei gas, in cui ricava l'equazione che descrive l'evoluzione temporale dello stato del sistema (modellizzato come un insieme di sfere rigide soggette a collisioni elastiche).
A partire da questa equazione, Boltzmann dimostra che, dato un qualunque stato iniziale, l'effetto delle collisioni è quello di portare il sistema in uno stato finale di

a.
Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), uno dei padri della termodinamica, ha coniato il termine "entropia".

equilibrio caratterizzato dalla distribuzione di Maxwell e che nel corso di questa evoluzione il valore di una particolare funzione di stato (che indica con *H*) decresce monotonicamente fino a raggiungere un minimo all'equilibrio. Le leggi del moto sembrerebbero dunque permettere una riduzione alla meccanica anche del secondo principio, spiegando l'approccio irreversibile all'equilibrio e l'aumento dell'entropia.
La validità del "teorema *H*" di Boltzmann è ben presto soggetta a critiche e messa in discussione, sia da parte di chi sostiene comunque la bontà dell'ipotesi atomica, come il suo maestro Joseph Loschmidt, sia – e soprattutto, insistentemente – da chi ritiene che essa sia priva di fondamento e che sia dunque vano ogni tentativo di fornire una base meccanica ai principi della termodinamica. L'obiezione è semplice, ma al tempo stesso concettualmente fortissima: le leggi della dinamica sono reversibili e non è quindi possibile pensare di spiegare attraverso di esse comportamenti intrinsecamente irreversibili. Se un gas confinato inizialmente in un volume dato viene lasciato libero di espandersi in una cavità, non lo si osserverà mai ritornare spontaneamente nella condizione iniziale, mentre le leggi della dinamica non lo proibiscono affatto. Anzi, prevedono che succeda esattamente questo, purché si prenda come stato iniziale quello finale, dopo l'espansione, invertendo le velocità delle molecole del gas.
La battaglia in difesa dell'ipotesi atomistica, e della fondatezza di una interpretazione dei fenomeni macroscopici sulla base delle proprietà dei costituenti microscopici, sarà la principale occupazione di Boltzmann fino alla sua morte nel 1906. Il primo passo consiste nella ammissione esplicita che il suo teorema *H* non discende esclusivamente dalla meccanica, ma comporta l'assunzione di ipotesi probabilistiche, e porta gradualmente a una lettura del secondo principio che vede l'approccio irreversibile all'equilibrio non più come una rigida necessità, ma come la realizzazione della sequenza di stati del sistema di gran lunga più probabile. Per chiarire il senso della nozione di "stato più probabile", Boltzmann introduce nel 1877 un approccio al problema radicalmente diverso, che conduce però alle medesime conclusioni.
Anziché studiare l'evoluzione temporale di un singolo sistema, Boltzmann associa ad ogni possibile stato macroscopico una probabilità, proporzionale al numero di modi diversi in cui si può distribuire l'energia tra i numerosi microsistemi che lo compongono. In questo modo si può associare la grandezza macroscopica "entropia di uno stato" alla sua probabilità (più precisamente, al logaritmo della sua "molteplicità") e lo stato di equilibrio, quello con il massimo valore dell'entropia, corrisponde semplicemente allo stato più probabile. È l'atto di nascita della meccanica statistica.
Che la "maggiore probabilità" corrisponda nei fatti a una certezza osservativa discende dal numero estremamente elevato dei componenti microscopici del sistema considerato. Come Boltzmann fa osservare, rispondendo ai suoi critici, dubitare della validità della meccanica statistica solo perché non si sono mai osservati fenomeni possibili in linea di principio è come sostenere l'infondatezza del calcolo elementare delle probabilità, perché non si è mai osservata, lanciando mille volte una moneta, una sequenza di mille "teste", anche se la probabilità che ciò accada non è rigorosamente nulla.

b.
Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), insieme a J.C. Maxwell e a J.W. Gibbs, ha gettato le basi della meccanica statistica.

c.
Sulla tomba di Boltzmann allo Zentralfriedhof di Vienna è incisa l'epigrafe con la famosa formula per l'entropia che gli è attribuita.

Che i numeri in gioco, parlando di una quantità macroscopica di gas, fossero estremamente elevati era del tutto ovvio. Ma quali fossero esattamente è rimasta a lungo una domanda senza risposta precisa. Anche per questa ragione, la relazione di proporzionalità tra entropia e probabilità ipotizzata da Boltzmann vede nella sua espressione la presenza di una costante, il cui valore rimane indeterminato. Incisa sulla sua tomba come riconoscimento al suo principale contributo alla fisica teorica, $S = k \log W$ è un'espressione che in quella forma Boltzmann non ha mai scritto. Ironia della storia, il primo a scriverla in quel modo, introducendo esplicitamente il termine k (o k_B, come comunemente si indica oggi) e calcolandone il valore, è stato, nella sua prima derivazione della legge di distribuzione spettrale della radiazione di corpo nero alla fine del 1900, Max Planck, che negli anni precedenti si era distinto come uno dei più autorevoli oppositori dell'ipotesi atomistica e dell'approccio probabilistico di Boltzmann (vd. anche p. 36 in Asimmetrie n. 19, ndr).

Avogadraffollato

di Giuliana Galati

Poverini gli atomi, costretti a stare sempre uno legato all'altro, penso rigirando tra le mani un blocchetto di 12g di carbonio. Lo vedo come un immenso condominio, dove immagino possano nascere storie d'amore tra atomi, ma anche tante beghe, proprio come in tutti i posti affollati.

[as]: Ma quanti siete qui dentro?

[atomo di carbonio]: $6{,}02214076 \times 10^{23}$, ovvero 602.214.076 milioni di miliardi.

[as]: Ah già! Che domanda sciocca che ho fatto: 12 g di carbonio corrispondono a una mole e ogni mole contiene un numero di Avogadro di entità elementari (atomi, molecole...). Certo rispetto a un condominio...

[atomo di carbonio]: Non c'è paragone! Ti faccio un esempio. Secondo te, su tutto il pianeta, esistono $6{,}02214076 \times 10^{23}$ granelli di sabbia? Valgono i granelli delle spiagge, ma anche quelli sommersi nel mare, nei laghi e persino nelle boccette che i turisti si portano a casa per ricordo.

[as]: Non saprei... Non è un conto facile da fare su due piedi! Come si fa?

[atomo di carbonio]: Ah boh, non chiedere a me. Io non ce li ho neanche i piedi! Però sono stato per molto tempo parte di un essere umano che non faceva che leggere curiosità di questo tipo invece che lavorare... e mi sono fatto una certa cultura! Si stima che sulla terra ci sia qualche sestilione di granelli di sabbia. Le stime dicono che potrebbero essere 3 sestilioni oppure 10... Noi per semplificarci i conti ipotizziamo siano 6.

[as]: Mi sono persa al sestilione...

[atomo di carbonio]: Che fatica. Un sestilione equivale a 10^{21}. Ovvero un 1 seguito da 21 zeri: 1.000.000.000.000.000.000.000. Quindi dicevamo che i granelli di sabbia sono all'incirca 6 sestilioni: 6×10^{21}.

[as]: Il numero di Avogadro è circa 6×10^{23}, quindi dentro questo blocchetto ci sono più atomi di quanti granelli di sabbia ci sono nel mondo?

[atomo di carbonio]: Esatto... Devi sommare i granelli di sabbia di 100 mondi tali e quali a questo per averne un numero pari a quello degli atomi di questo "condominio", come lo chiami tu. Capisci bene che "affollato" non è un termine sufficiente per descrivere cosa succede qui, dovreste coniarne uno nuovo! Tipo... avogadraffollato!

[as]: Ma come ha fatto Avogadro a contarvi tutti?

[atomo di carbonio]: In realtà il caro vecchio Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro, conte di Quaregna e Cerreto, non è mica riuscito a contarci. Non ci ha neanche provato! Lui ha solo capito che volumi uguali di gas diversi, alla stessa temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di molecole.

a.
Il busto di Amedeo Avogadro nell'atrio del Dipartimento di fisica dell'Università di Torino.

[as]: Ma 6,02214076x10^{23} non è chiamata costante di Avogadro?

[atomo di carbonio]: Sì, ma impropriamente. Per riuscire a calcolare quel numeraccio, infatti, bisognava conoscere la grandezza degli atomi o delle molecole che compongono una sostanza. Conta che siamo all'epoca di Napoleone: l'idea di Avogadro, infatti, è del 1811!

[as]: Ma allora chi ha misurato o calcolato il numero di Avogadro?

[atomo di carbonio]: Più persone ci hanno provato. Il primo fu Thomas Young, contemporaneo di Amedeo, che si sbagliò di poco, considerando i mezzi a disposizione: calcolò che l'acqua fosse fatta da particelle di dimensioni comprese tra i 5000 e i 25.000 milionesimi di centimetro. In realtà una molecola d'acqua è diecimila volte più piccola, ma vorrei vedere te a ricavare questa dimensione dalla tensione superficiale e pressione interna di un liquido, attraverso quantità complesse da conoscere come il raggio d'azione della forza intermolecolare!

[as]: Ci mancherebbe, anzi tanto di cappello per il risultato!

[atomo di carbonio]: Dopo di lui c'è stato Johann Josef Loschmidt, che dalla teoria cinetica dei gas e dalla misura della lunghezza media del cammino libero delle molecole ricavò che il numero di particelle in una mole fosse 5x10^{22}.

[as]: C'era arrivato quasi anche lui! Un ordine di grandezza di differenza, che è tantissimo, ma in fondo su questi numeri…

[atomo di carbonio]: Eh insomma! Io mi sentirei solo con 5,5x10^{23} compagni in meno! E non mi crederai, ma ci conosciamo tutti per nome! Anzi, che maleducato, non mi sono presentato: io sono Carbonio. Il mio vicino qui, invece, è Carbonio, mentre quello laggiù in fondo si chiama Carbonio: è un simpaticone! Quello nell'angolo lì…

[as]: Ho capito, ho capito, grazie! Ma alla fine chi è riuscito a misurare il numero di Avogadro e perché non l'ha chiamato con il proprio nome?

[atomo di carbonio]: Ci è arrivato molto vicino Jean Perrin quasi un secolo dopo Avogadro, e nel 1962 ha vinto anche il premio Nobel per questo! L'idea su come farlo, però, era del mitico Albert Einstein, che pure lo calcolò avvicinandosi tantissimo al valore esatto. Entrambi usarono tecniche basate sul moto browniano, cioè derivanti dall'osservazione di come si muovono particelle sospese in un liquido, e in questo modo confermarono anche la teoria atomica della materia. Fu Perrin a dire che gli sembrava giusto che tale numero portasse il nome di Avogadro.
Per la fine della storia, almeno per ora, bisogna arrivare ai giorni nostri: il 20 maggio del 2019 il Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), l'ente che si occupa ufficialmente del Sistema Internazionale di unità di misura, ha definito la costante di Avogadro come il valore esatto 6,02214076×10^{23}/mol ed è una delle costanti fisiche fondamentali.

[as]: Grazie per tutte queste informazioni interessanti! Adesso, però, sento il bisogno di stare un po' da sola…

Le costanti e la metrologia contemporanea

di Giulia Formica

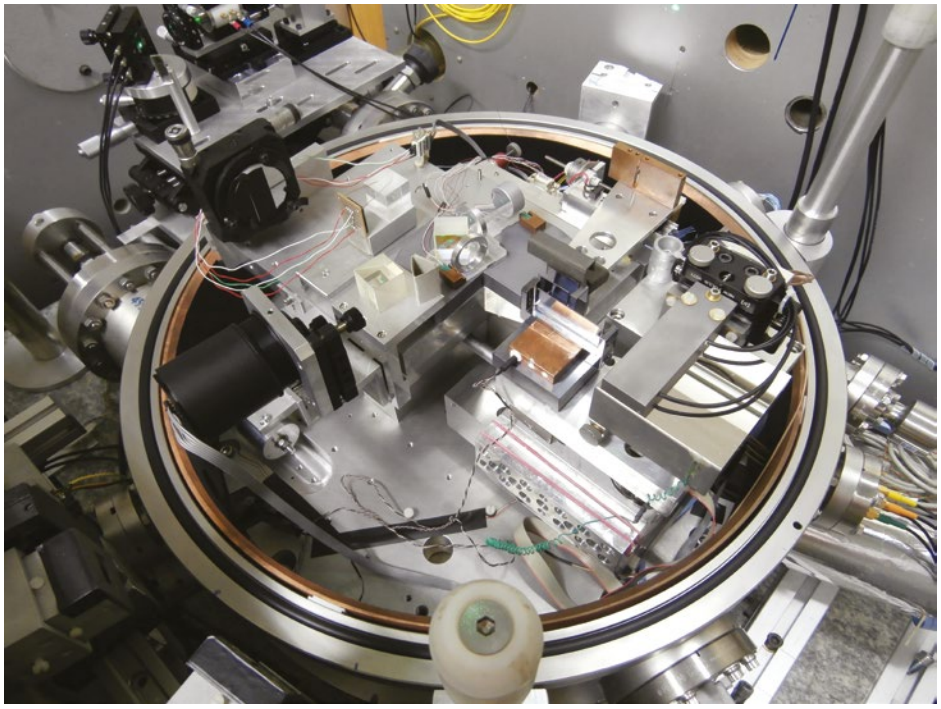
Ritardare in stazione, rilevare un'onda gravitazionale, pesare un carico merci: azioni diverse, tutte legate alla capacità di misurare. Una cosa che sembra ovvia, ma non lo è. Come siamo sicuri che un metro in Giappone sia lo stesso in Italia? Ne parliamo con Enrico Massa, ricercatore all'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), che ci spiega come le costanti fondamentali della fisica giochino un ruolo fondamentale.

[as]: Quali progetti di ricerca portate avanti nell'Istituto? Cosa distingue l'INRiM dagli altri istituti di ricerca italiani?

[Enrico Massa]: L'INRiM è responsabile dello sviluppo della scienza e della tecnologia metrologica, della sua applicazione a beneficio dell'industria e della società sia a livello nazionale che internazionale. L'Istituto, vigilato dal Ministero dell'Università e della Ricerca, è quindi chiamato sia a misurarsi con altri enti pubblici di ricerca sul piano dell'eccellenza scientifica sia a svolgere per legge la missione di istituto metrologico primario, per supportare, accompagnare e sostenere lo sviluppo tecnologico del Paese. Un documento di Vision orienta lo sviluppo dell'Istituto al 2030 in direzione delle grandi sfide globali.

[as]: Scienza e tecnologia metrologica sono fondamentali per avere misurazioni accurate in ambito scientifico, industriale e tecnologico. Come è cambiato nel tempo il modo di misurare le grandezze?

[EM]: Per secoli l'uomo è stato la misura di tutte le cose: dita, passi, piedi. Ogni civiltà aveva il suo sistema di pesi e misure. Pensiamo agli egizi: le prime bilance sono raffigurate nel libro dei morti per confrontare il cuore del defunto con una piuma e giudicarne l'operato in vita.
Per scambi commerciali e misure sperimentali è però necessario riferirsi alla stessa grandezza con unità confrontabili. Il primo passo verso una standardizzazione avvenne durante la Rivoluzione francese in cui le tecnologie iniziarono a essere mature per introdurre unici riferimenti per pesi e misure. La lunghezza del meridiano terrestre fu presa a riferimento per il metro, e con un dm^3 d'acqua si stabilì la massa per definire il chilogrammo. L'avvento della metallurgia permise poi di condensare l'informazione in una barra e un cilindro di platino. Nell'800 la rivoluzione industriale rese necessaria l'adozione di un sistema di misura internazionale e, nel 1875, venne firmata la Convenzione del Metro, un trattato internazionale tra 17 paesi, Italia inclusa, che costituì l'Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure (Bureau International des Poids et Mesures – BIPM).



b.
Esperimento per la determinazione assoluta del volume della cella elementare del silicio mediante interferometria combinata ottica e a raggi X.

Il primo sistema di unità era formato da lunghezza, massa e tempo; negli anni si aggiunsero corrente elettrica, intensità luminosa, temperatura e mole: le 7 grandezze del Sistema Internazionale (SI). Di recente è avvenuto un altro cambio epocale: le unità di misura sono definite tramite alcune costanti della fisica.

[as]: Quali sono i vantaggi di usare le costanti fondamentali?

[EM]: Basarsi sulle costanti è più attendibile di un campione fisico soggetto a possibili variazioni nel tempo.
In passato la lunghezza di una barra campione era definizione e realizzazione del metro (come per il chilogrammo con una massa campione), oggi le grandezze considerate convenzionalmente di base vengono definite attraverso delle costanti fisiche e dalle definizioni si costruiscono gli esperimenti per realizzarle. Il metro è definito come la distanza percorsa alla velocità della luce nel vuoto in un 1/299.792.458 di secondo e la sua realizzazione può essere attuata misurando il tempo di volo di un segnale luminoso.
Questo nuovo sistema è stabile, definito secondo le più attuali conoscenze, e apre le porte a nuovi esperimenti in grado di implementare le definizioni. Ad esempio, oggi, grazie alle costanti fondamentali, possiamo realizzare direttamente una massa alla scala di accuratezza richiesta senza dover trasferire l'informazione a partire dal campione di riferimento.

[as]: Il chilogrammo è definito dalla costante di Planck solo dal 2018: quali sono state le difficoltà riscontrate e l'impatto per il mondo scientifico?

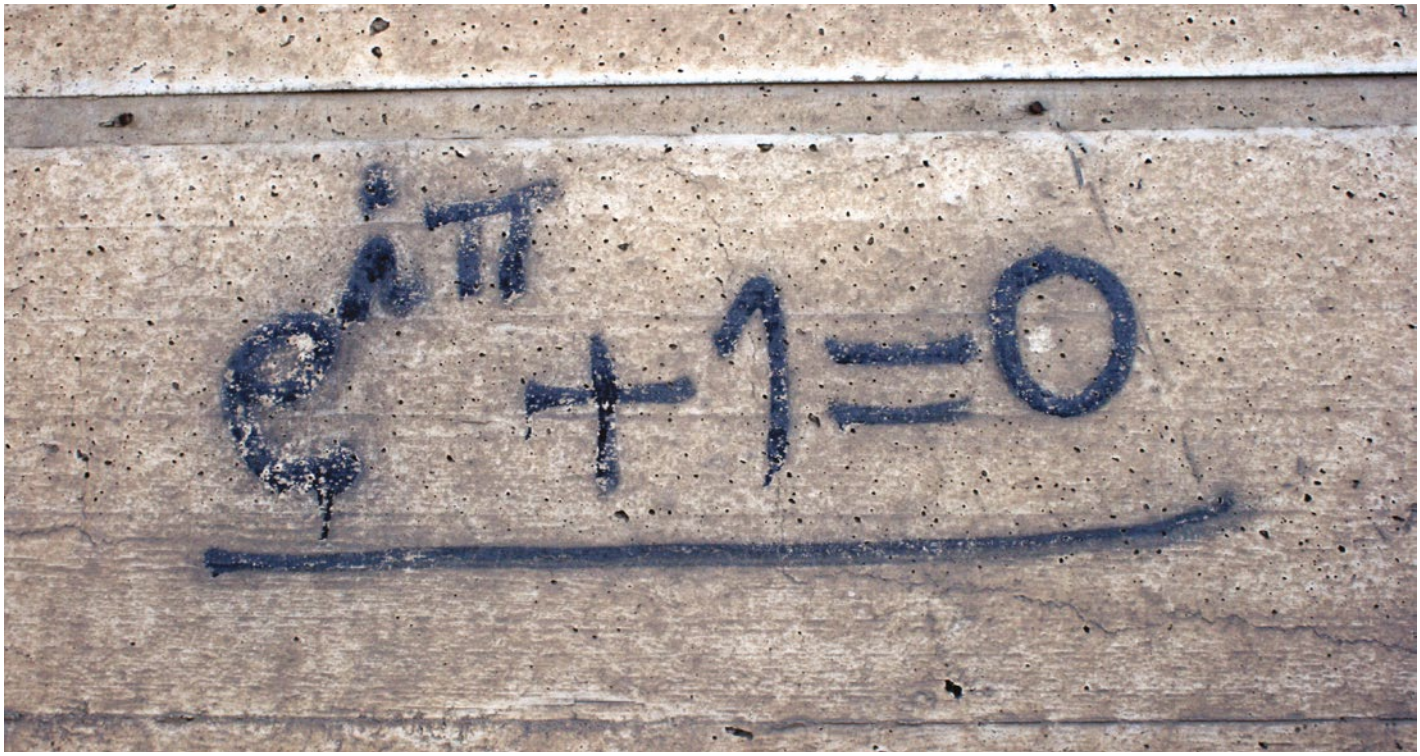
[EM]: Fino al 2018, il chilogrammo era definito dalla massa di un cilindro di platino-iridio conservato al BIPM, ma il "peso" campione cambiava nel tempo: era necessaria una nuova definizione.
Intorno agli anni '60, la scienza e la tecnologia crearono i primi lingotti di silicio, un cristallo i cui atomi sono ordinati nello spazio ed è quindi possibile predirne il numero in un volume noto. Claudio Egidi, ricercatore dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, oggi confluito nell'INRiM, pensò di ridefinire il chilogrammo contando gli atomi in un cristallo di silicio macroscopico e calcolando la massa totale a partire dalla massa atomica dell'elemento.
La tecnologia dell'epoca non permetteva però un tale esperimento.
Solo negli anni '80, grazie a Gianfranco Zosi dell'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti del CNR, anch'esso ora parte dell'INRiM, furono realizzate le prime sfere di silicio e introdotta in Italia l'interferometria congiunta ottica e a raggi X per misurare la distanza interatomica nel silicio (vd. fig. b).
Dal 1998, ho partecipato al Progetto Avogadro, in cui l'INRiM è stato l'unico istituto al mondo a misurare il volume microscopico degli atomi di silicio contenuti in una sfera di silicio monoisotopico quasi perfetta con le incertezze richieste per la sostituzione del chilogrammo.
Per realizzare l'unità di massa esiste anche un secondo esperimento alternativo, la bilancia di Kibble che, confrontando potenze elettriche e meccaniche, misura il rapporto tra una massa di riferimento e la costante di Planck.
La disseminazione nazionale del chilogrammo è però ancora lontana e per garantire stabilità alla scala di massa a livello internazionale, considerando che pochi istituti al mondo sono in grado di realizzare autonomamente il chilogrammo, si è deciso di disseminare il suo valore mediante un *consensus value*, un valore di riferimento internazionale basato sulle migliori realizzazioni degli Istituti metrologici di tutto il mondo.

[as] intersezioni

Segni sognanti

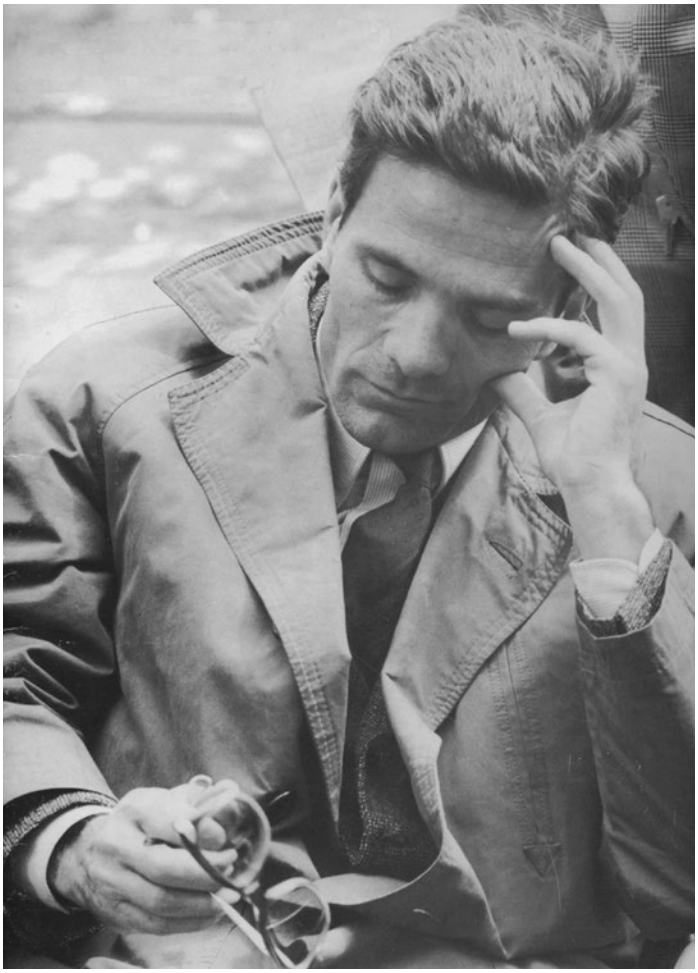
di Sandra Lucente

docente in matematica



Nella raccolta "Poesia in forma di rosa" Pier Paolo Pasolini parla di "escogitare un sistema di segni, sistemare un sistema di segni, trovare segni una volta per sempre internazionali e scoperchiare segni sognanti". La stessa evoluzione si può applicare ai segni di cui la matematica è piena, schierandosi tra coloro che pensano che gli oggetti del suo linguaggio si inventino e non si scoprano.
Ogni segno matematico ha una sua storia che parte dal momento di necessaria introduzione o di casuale intuizione, passa per la sua affermazione nella comunità scientifica e l'uso dello stesso simbolo in universi matematici differenti, e arriva al racconto divulgativo.
Racconti interessantissimi, come quello dell'"identità di Eulero", l'equazione definita dal fisico Richard Feynman la "formula più bella della matematica": $e^{i\pi} + 1 = 0$. In tanti oggi scelgono questa formula come tatuaggio, forse perché sembra un viaggio disordinato nello spazio e nel tempo: c'è l'unità dei greci antichi e i cerchi di Archimede; lo "zefiro" arabo, zero degli indiani in Oriente e "spazio vuoto" nelle tavole Babilonesi e dei Maya; gli studi inglesi seicenteschi sui logaritmi e le funzioni esponenziali degli svizzeri settecenteschi, c'è l'Ars Magna dell'italiano Cardano e la Germania di Gauss.
La storia del lungo viaggio dello zero sulle navi pisane per poi abitare le borse mondiali e i computer di ogni casa ci fa render conto di come "escogitare un sistema di segni" con lo zero sia stata una idea straordinaria.
Il numero "uno", invece, ha una origine concettuale talmente innata che raccontarne genesi e utilizzi sarebbe impensabile. Ogni ambito del sapere (dalla biochimica alla sociologia) ha "sistemato il suo sistema di segni" includendo l'unità.
Pi-greco (π) è al contrario un segno molto tardivo rispetto al problema che lo definisce da millenni: il rapporto invariante tra la circonferenza e il suo diametro, che ha ispirato tanti matematici per la sua approssimazione, fu denotato con solo π

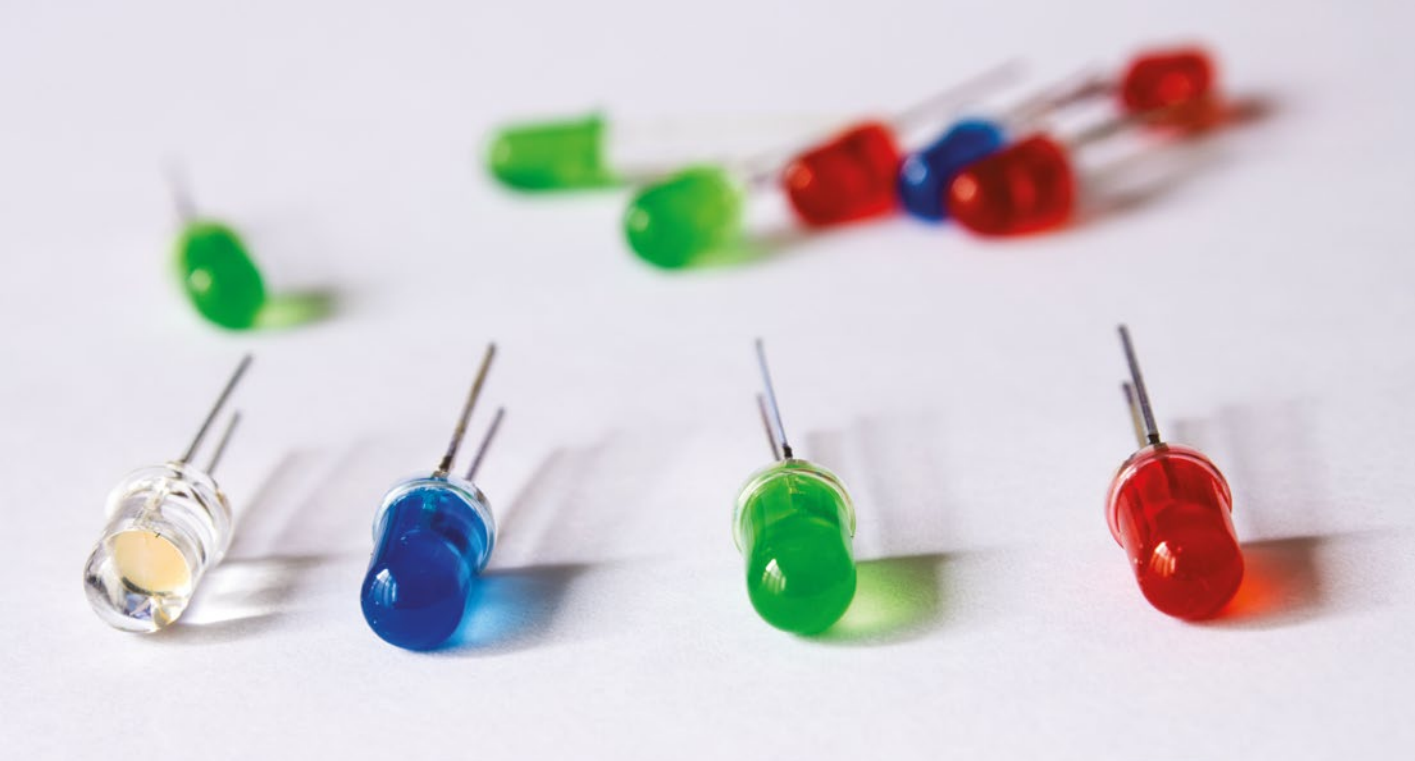
nel 1706 in uno scritto di William Jones. Questo segno divenne "per sempre internazionale", grazie all'utilizzo continuo che ne fece nello stesso secolo il grande matematico Leonhard Euler (in italiano noto come Eulero).
Il nostro sistema matematico di segni diventa "sognante", se conduce oltre l'esperienza del reale, e questo accade ogni volta che si ha a che fare con l'infinito. La traccia grafica dell'infinito è nei numeri irrazionali, che corrispondono a rapporti geometrici, come ad esempio quello tra lato e diagonale in un quadrato. Per quanto i pitagorici volessero negare l'evidenza della cosa, ogni volta che disegniamo un quadrato o la stella di diagonali in un pentagono regolare, l'infinito ci guarda dal foglio e ci interroga. La domanda diventa sfidante se tracciamo la circonferenza e il suo diametro: "c'è infinito in questo rapporto?", chiedeva il foglio fino alla fine del '700. E il matematico faceva scena muta. Tenendo conto che il genere Homo ha tracciato cerchi già 40.000 anni fa, si tratta della più lunga interrogazione della storia!
A saper rispondere fu Eulero, il quale, applicando alla geometria somme e prodotti infiniti, risolse nel 1735 il problema di Basilea e ottenne π (al quadrato diviso 6) mediante una meravigliosa somma dei reciproci degli interi al quadrato. Il suo collega Johann H. Lambert usò simili argomenti per dimostrarne l'irrazionalità. Dopo un processo limite di Jean Bernoulli, in un calcolo di Christiaan Huygens l'area unitaria sotto l'iperbole rettangolare poneva analoghe domande: la costante che Eulero, in una lettera a Goldbach del 1731, aveva indicato con "*e*", la base per i logaritmi prediletta da Giovanni Nepero, si poteva rappresentare elegantemente come somma di infiniti termini? Da questi segni sognanti si poteva dedurne l'irrazionalità? Anche in questo caso Eulero trovò l'elegante serie di reciproci dei fattoriali per dimostrare entrambe le cose. Ma la passione di Eulero per le serie non finì qui, ottenne lo sviluppo delle funzioni seno e coseno e si accorse che la loro combinazione conduceva proprio a quella del numero di Nepero *e,* a condizione di sistemare i segni alterni. A tale scopo usò l'unità immaginaria "*i*", la cui caratteristica è che $i^2 = -1$. Questa era stata introdotta solo formalmente per far tornare la molteplicità delle soluzioni delle equazioni polinomiali. Anzi, fu proprio lui ad assegnare una vocale, come già fatto per *e*, al più sognante e discusso dei segni matematici. Questo gli consentì di riscrivere quelle somme infinite nella breve formula $e^{i\theta} = \cos\theta + i \sin\theta$.
Ma quale geometria raccontavano questi segni escogitati? Si sistemavano in un'immagine? Dalla formula bisognava tornare a guardare il foglio e passare alla forma.
Così come Pasolini aveva detto "scoperchiare segni sognanti", così Carl Friedrich Gauss aveva scoperchiato il piano cartesiano, mostrando l'universo dei numeri complessi. In questo nuovo mondo, θ diventa un angolo, mentre $e^{i\theta}$ si situa sulla circonferenza unitaria. Basta quindi mettere $\theta = \pi$, ricordare che $\cos\pi = -1$ e $\sin\pi = 0$ ed ecco che in poche battute ritroviamo la protagonista della nostra storia: $e^{i\pi} + 1 = 0$.
Filosoficamente, stiamo parlando di una formula un po' platonica e un po' realista, che racchiude sia l'uguaglianza e la somma, nate con l'uomo stesso, che la moltiplicazione e l'elevamento a potenza, introdotte per semplificare i calcoli, oltre alla geometria del piano e la fisica delle onde. Come diceva Pasolini, "per essere poeti bisogna avere molto tempo", ma di certo non ne serve di meno per essere scienziati!



b.
Pasolini durante una pausa nella lavorazione di un film.

Misurare la costante di Planck con i LED

di Anna Greco



a.
A seconda del materiale utilizzato per realizzarlo, il LED emette luce in differenti colori.

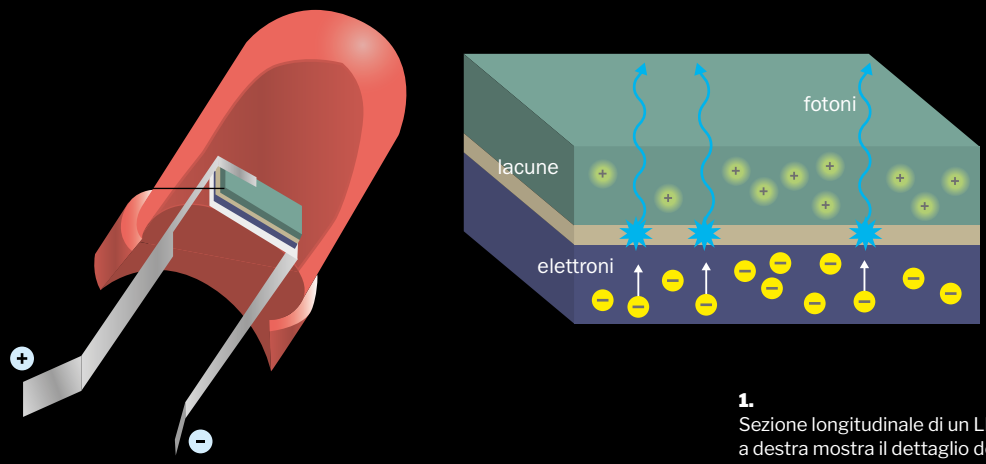
La fisica quantistica è entrata ormai da diversi anni fra gli argomenti di studio della scuola secondaria di secondo grado, ma studenti e studentesse si confrontano con la difficoltà di affrontare idee astratte e difficili da visualizzare come sono quelle dell'infinitamente piccolo. Tuttavia, è possibile rendere più "tangibili" alcuni di questi concetti, realizzando a scuola una misura della costante di Planck con materiali elettronici a basso costo e facili da reperire.
I primi a proporre l'esperienza furono Patrick J. e Leah R. O'Connor, docenti universitari americani, in un articolo del 1974 apparso sulla rivista dell'American Association of Physics Teachers. Riscontrando la difficoltà di proporre una misura sperimentale della costante di Planck agli studenti, nell'articolo si chiedevano: "Quanto sarebbe più convincente, se potessimo posizionare un voltmetro tra un orbitale e l'altro e calcolare l'energia in elettronvolt? La fisica dello stato solido ci permette oggi di fare qualcosa di quasi altrettanto efficace". Tra gli anni '60 e i '70, infatti, erano nati e si erano diffusi i primi LED.
L'esperienza è stata rielaborata nel corso degli anni da altri docenti, diventando quasi un classico; oggi se ne trovano sul web diverse declinazioni, alcune delle quali prevedono anche l'utilizzo di schede programmabili. Una descrizione particolarmente accurata si trova sul sito web del progetto LS-OSA, dedicato alla didattica laboratoriale: l'esperimento è qui descritto passo passo e vengono fornite anche delle indicazioni per semplificare la trattazione dei dati, adattandola alle competenze degli studenti dell'ultimo anno di scuola (vd. https://ls-osa.uniroma3.it/esperimenti/ii-grado/fisica/f121).
L'idea di base è quella di sfruttare le proprietà

fisiche dei LED: essi sono costituiti da materiali semiconduttori che hanno la caratteristica di emettere fotoni (e quindi accendersi) quando vengono attraversati da una corrente elettrica. Perché l'emissione dei fotoni avvenga, però, il LED deve assorbire sufficiente energia: esiste un valore di soglia al di sotto del quale il LED non emette fotoni. Tale valore è diverso per LED di diversi colori, che emettono fotoni con diversa frequenza e, quindi, diversa energia. Sfruttando la relazione tra energia assorbita ed energia emessa è possibile calcolare la costante di Planck.
La prima parte dell'esperimento consiste nel realizzare un semplice circuito in cui inserire i LED di diverso colore. Si misura la differenza di potenziale ai capi del LED e la corrente che circola nel circuito, variando la tensione in ingresso. Dai dati ottenuti, è possibile osservare che, inizialmente, la corrente nel circuito è molto piccola, ma cresce rapidamente una volta superato un certo valore di tensione, che è appunto il valore di soglia del LED. Si procede così a ripetere la misura per LED di diverso colore, ovvero che emettono radiazione con diversa frequenza v, individuando i rispettivi valori di soglia V_s.
Nella seconda parte dell'esperienza si utilizzano i dati ottenuti per calcolare la costante di Planck, sfruttando la relazione $eV_s = hv$, che lega l'energia (la quantità hv, che contiene la frequenza v) acquisita dai portatori di carica e che attraversano il LED quando si raggiunge la tensione di soglia V_s. Questo procedimento permette di comprendere meglio il significato fisico della costante di Planck pur attraverso la misura di fenomeni apparentemente macroscopici. Infine, confrontando il valore ottenuto per la costante di Planck con quello noto, si può anche discutere con gli studenti dell'accuratezza della misura, delle fonti di errore e del trattamento degli errori di misura.

[as] approfondimento

I LED

Il nome LED è l'acronimo per *light emitting diode*, ovvero diodo a emissione di luce. Il LED è infatti un particolare tipo di diodo, cioè un dispositivo elettronico il cui funzionamento è basato sulle proprietà dei materiali semiconduttori. I sottili strati di materiale semiconduttore che costituiscono un LED vengono manipolati in modo da avere alle estremità due aree con densità di carica diversa, una negativa e l'altra positiva, fra le quali è presente una barriera di potenziale.
Quando il LED è attraversato da corrente, le cariche negative e positive si muovono le une verso le altre e, se la tensione applicata ai capi del LED è sufficiente a far "oltrepassare" la barriera di potenziale, si ricombinano emettendo energia sotto forma di radiazione luminosa. Maggiore è l'energia rilasciata, minore sarà la lunghezza d'onda della radiazione, e di conseguenza del colore visibile. Il processo è molto efficiente dal punto di vista energetico: le lampadine a LED in commercio oggi consumano molto poco rispetto alla luce che emettono.



1.
Sezione longitudinale di un LED rosso. Lo zoom a destra mostra il dettaglio della giunzione dei due sottili strati di materiale semiconduttore con densità di carica positiva e negativa.

Il Mistero del Fiore Primordiale

di Pietro Reviglio

Un quadro, come una formula matematica, racconta un mistero. Mistero di bellezza o di orrore, di un luogo o di una persona, di dimensioni umane o trascendentali, ma sempre un mistero racconta.
Qualche tempo fa ero nel mio studio a Londra quando mi capitò di leggere un articolo insolito sul sito della BBC. Mi sembrò così interessante da spingermi a prendere la prima tela a portata di mano e a mettermi a dipingerci sopra. Volevo riflettere su ciò che l'articolo raccontava: una cosa inusuale per me che lavoro principalmente nei paesaggi della mente e del cosmo, dell'infinito e dell'eternità, senza troppo farmi influenzare dai piccoli eventi della vita quotidiana.
Il mistero, però, risvegliava l'interesse dello scienziato e dell'artista. Raccontava il problema che perseguitò Darwin negli ultimi anni della sua vita e che lui stesso definì "*an abominable mystery*" (un mistero abominevole): la comparsa dei fiori, o meglio delle angiosperme, nell'evoluzione del mondo.
Ho studiato le galassie e le strutture a grande scala dell'universo prima di dedicarmi alle arti visive e posso capire che poco si comprenda l'universo nella sua immensità tanto da invocare, per spiegarlo, materia ed energia oscura di cui così poco si sa che ormai alcuni ne dubitano persino l'esistenza. Ma mi sembrava affascinante che quasi un secolo e mezzo dopo la morte di Darwin l'origine primordiale di un fiore non fosse chiara, anzi assolutamente avvolta nelle nebbie del tempo e degli spazi siderali.
Era affascinante contemplare come l'universo e le sue leggi fossero razionalmente conoscibili per quell'insieme di trilioni e trilioni di cellule che chiamiamo "essere umano", ma che al tempo stesso esistesse un velo che sembrava mantenere il mistero sui segreti dell'universo e che, come in un gioco di specchi, ogni rivelazione si aprisse come un fiore su un nuovo mistero, su un paradosso più grande.
Dipingendo pensavo: dove nell'oscurità dell'universo primordiale era scritta la possibilità della nascita di un fiore? Conoscere non significa comprendere. Si può conoscere molto e comprendere poco. Da dove veniva la legge fisica che aveva permesso al primo fiore di esistere? Nelle leggi fondamentali della fisica non vedevo nulla che parlasse di riproduzione sessuata di cui, in fondo, il fiore è l'archetipo. Esisteva prima del Big Bang questa legge? O era venuta dopo? E come? E perché?

b.
The Mystery of the Primordial Flower, 2024, olio su tela.

La somma pittrice che è la Natura – o la mano di Dio – come in un quadro surrealista, ama metterci di fronte al dilemma della contraddizione, dell'impossibile.
La contraddizione della particella che è onda e corpuscolo, il tempo che nelle sue pieghe nasconde i paradossi della relatività e della meccanica quantistica, i numeri immaginari necessari per descrivere l'infinitamente piccolo, il mistero di cosa si nasconda oltre l'orizzonte degli eventi nell'infinitamente grande… e poi il fiore, la coscienza, l'inconscio, il Bene, il Male… più ci si addentra, più si comprende, o si crede di comprendere, e più il mistero pare infittirsi. Più si osserva il quadro della natura e più ci rivela qualcosa, ma ci trasporta in un'altra dimensione della conoscenza – intuitiva, irrazionale, illusoria, come illusoria è una realtà che appare per ciò che non è. Come in un quadro astratto, in cui ogni nuovo dettaglio scoperto osservando la tela può far scorgere forme nuove, significati nuovi, così ogni scoperta scientifica arricchisce il quadro con pennellate sempre diverse, ma non necessariamente coerenti.
Qualche anno fa dipinsi un "Fiore Cosmologico" – un fiore nato nel sangue, perché in fondo nel sangue nasciamo e nel sangue è il mistero della vita e della morte, dell'esistenza, della transustanziazione, dell'orrore e della bellezza. Era l'inizio di un pensiero che legava l'infinito alla vita e che in questo nuovo lavoro nato a Londra quasi per caso si arricchiva di nuove domande.
Fragile l'esistenza, come un fiore. Misteriosa, come il Primo Fiore. Arthur Miller pensava che il lavoro dell'artista fosse quello di ricordare alla gente ciò che aveva scelto di dimenticare. Ecco, forse questo io vorrei ricordare: il mistero nascosto nel grande quadro dell'esistenza e nel suo primo fiore.

Science Gateway

di Cecilia Collà Ruvolo

Un viaggio indietro nel tempo fino all'origine del nostro universo, un viaggio che svela come da una zuppa primordiale di particelle siamo arrivati all'universo che conosciamo oggi; la scoperta dei grandi esperimenti del CERN e della sua comunità di scienziate e scienziati, che ci permettono di raccontare questo viaggio; e poi ancora una grande avventura nel mondo microscopico alla scoperta delle stranezze della meccanica quantistica. Questo e molto altro è il Science Gateway, il centro del CERN dedicato al pubblico, alle scuole e in particolare ai bambini.
L'educazione è uno dei pilastri fondamentali della missione del CERN: coinvolgere il pubblico nell'impresa e nei risultati della scienza e formare le nuove generazioni che vi prenderanno parte in futuro. Per queste ragioni, a ottobre 2023 è stato inaugurato questo nuovo spazio che ospita, oltre alle mostre permanenti ("Discover CERN", "Our Universe" e "Quantum World"), mostre temporanee, laboratori e attività per tutte e tutti dai 5 anni in su, *science show* ed eventi.
Progettato da Renzo Piano Building Workshop, in collaborazione con Brodbeck Roulet Architectes Associés, l'edificio stesso simboleggia il legame tra la scienza e il pubblico: due grandi tunnel sospesi, che rappresentano gli acceleratori di particelle, sono collegati da un ponte che attraversa la strada principale che da Ginevra conduce al CERN. In questa cornice, un auditorium da 900 posti accoglie visitatori e visitatrici durante eventi e *science show*, e una scenografia immersiva accompagna il pubblico in un percorso che dalle sale sotterranee del CERN, con le straordinarie macchine che costituiscono questo grande laboratorio, porta all'origine dell'universo e infine al mondo dei quanti. Ci sono exhibit per tutti i gusti, multimediali e meccanici: si possono giocare partite di calcio con i protoni e di tennis quantistico con gli elettroni, si può riscoprire il bosone di Higgs creando e facendo collidere le particelle e poi analizzando le tracce e le miriadi di nuove particelle nate dalle collisioni. Si possono ascoltare scienziate e scienziati che raccontano il loro lavoro e le grandi tecnologie dei laboratori. Si può intrappolare l'antimateria, tornare indietro nel tempo e creare una stella da lanciare nello spazio. Ci si può trasformare in elettroni e vivere un percorso interattivo e immersivo per provare in prima persona le leggi quantistiche. Tra gli exhibit e le installazioni, lo spazio "Esplorare l'ignoto" è dedicato alle esposizioni di alcune opere d'arte contemporanea del programma Art@CERN, in cui artiste e artisti in residenza al CERN dialogano con le ricercatrici e i ricercatori per esplorare temi scientifici di grande suggestione come il vuoto dello spazio, l'invisibile, lo spazio e il tempo.
Grazie alle esposizioni, alle iniziative proposte e alla varietà di pubblici a cui si rivolge, il Science Gateway è un ponte tra il laboratorio e la società, tra la ricerca e la scuola, tra la scienza e l'arte.

[as] traiettorie

Insegnare a meravigliarsi

di Francesca Mazzotta

"Mi piace molto l'idea di contribuire a formare le generazioni future. E sono convinta che avere dei buoni strumenti di base di matematica e di fisica e, in generale, riuscire a guardare il mondo con delle migliori capacità logiche sia importante per tutti e tutte, indipendentemente dal percorso di studi che intraprenderanno". Milène Calvetti è oggi insegnante di matematica e fisica in un liceo artistico a Pisa, un lavoro che la appassiona e grafitica molto. Prima di approdare nel mondo della scuola, ha conseguito un dottorato in fisica e ha lavorato come ricercatrice per l'esperimento ATLAS al CERN. L'abbiamo incontrata e ci ha raccontato il suo percorso.

"La scelta di insegnare è stata costruita nel tempo, è una possibilità che ho sempre considerato ma che ho rimandato a lungo, perché fin dal mio lavoro di tesi magistrale ho iniziato a lavorare in un gruppo di ricerca in cui mi trovavo molto bene. Così ho proseguito con un dottorato, a cui sono seguiti un assegno di ricerca e una borsa, che mi hanno permesso di lavorare per un anno al CERN, a Ginevra. In questo periodo mi sono occupata soprattutto dell'analisi dei dati dell'esperimento ATLAS e in particolare di un decadimento del bosone di Higgs in due quark b. Poi tra il 2020 e il 2021, forse spinta anche dalle restrizioni legate al Covid, che hanno limitato la mia esperienza al CERN, ho deciso che non avrei rimandato più e che avrei provato a insegnare. Sono stata fortunata, perché proprio nell'estate del 2021 è stato bandito un concorso per la scuola che mi ha permesso di entrare subito di ruolo. Oggi sono molto felice di lavorare in un liceo artistico: mi piace la sfida di insegnare una materia che non è necessariamente la preferita dei miei studenti e studentesse. Questo mi ha permesso di uscire un po' dalla bolla in cui vivevo, permettendomi di confrontarmi con problemi che non avevo mai vissuto prima".

Tuttavia, Milène non nasconde di aver incontrato qualche difficoltà nella transizione tra ricerca e scuola. "Non amavo essere al centro dell'attenzione e avevo difficoltà nel riuscire a spiegare delle cose che per me erano semplici, in alcuni casi banali, a persone per cui non erano affatto scontate. Quindi iniziare a fare questo mestiere mi ha permesso di imparare tanto e di capire come affrontare alcune delle mie difficoltà. Mi auguro che continuerà a farlo ancora a lungo".

"Quello che mi manca di più della ricerca è la sua dimensione internazionale", ricorda Milène, "Ma lavorare come insegnante ti permette di coltivare quotidianamente relazioni con gli altri, forse un aspetto che mancava un po' nel mondo della ricerca. Soprattutto, insegnare ti regala qualcosa di impagabile: i "wow" e gli "ah, finalmente!" di studentesse e studenti, quando riescono a capire qualcosa che avevano avuto difficoltà a comprendere. Una grande soddisfazione che prova che sei riuscita a trovare la strada giusta per arrivare fino a loro".

[as] lampi

Tratto da "Neanche gli Dei" (*The Gods Themselves*) di Isaac Asimov, 1972

PARTE TERZA
... Possono nulla?

[...]
– Ma tu cosa vuoi, Barron?
– Voglio la verità.
– Non hai però deciso in anticipo che la verità deve essere quella che vuoi tu? Tu vuoi una Stazione di Pompaggio sulla Luna, non è così? In modo da non avere niente a che fare con la superficie. E qualsiasi cosa contrasti con i tuoi desideri non può essere vera... per definizione.
– Non voglio discutere con te. Voglio la Stazione, e più ancora, voglio... il resto. Ma una cosa non serve, senza l'altra. Sei sicura di non avere...?
– Sicurissima.
– E per l'avvenire?
Selene gli si piazzò di fronte, battendo nervosamente un piede.
– Non gli dirò niente – disse. – Ma io devo saperne di più. Tu non hai informazioni da darmi, ma lui forse sì, o può ottenerne grazie agli esperimenti che tu ti rifiuti di fare. Gli parlerò, e riuscirò a sapere che cosa ha scoperto. Se cercherai di interporti fra noi, non riuscirai mai a ottenere quello che vuoi. Non aver paura che lui riesca ad arrivarci prima di me. È troppo abituato al modo di pensare terrestre. Non si azzarderà mai a fare il passo decisivo.
– Bene, ma non dimenticare anche la differenza tra Terra e Luna. Questo è il tuo mondo. Non ne hai altri. Quell'uomo, il tuo Ben... Denison, questo immigrante venuto dalla Terra può anche tornarci, se vuole. Ma tu non potrai mai andare sulla Terra. Sei una Lunarita e non puoi cambiare.
– Una vergine lunare – disse con scherno Selene.
– Vergine no – corresse Neville. – E quanto al pericolo dell'esplosione, se il rischio connesso al mutamento delle costanti fondamentali dell'universo è così grande, come mai i para-uomini, tanto più progrediti di noi tecnologicamente, non hanno pensato di fermare loro la Pompa?
Detto questo, se ne andò.
[...]

Copyright © 1972 by ASIMOV HOLDINGS LLC
© 2015 Mondadori Libri S.p.A., Milano, trad. di Beata Della Frattina

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
comedu@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T +39 0862 437265/450
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068342 356
stage@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
visiteguidate@lists.lns.infn.it
www.lns.infn.it

Raccontaci che cosa pensi di Asimmetrie su Instagram.
Pubblica storie, post e reel con l'hashtag
#AsimmetrieInfn e taggando l'account @infn_insights.
Condivideremo i tuoi contenuti.

www.infn.it

Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento

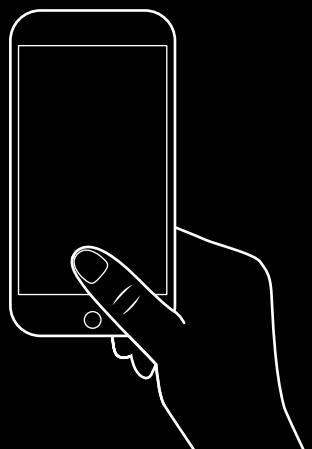
Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
http://www.asimmetrie.it/index.php/faq

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.

DISPONIBILE SU App Store

DISPONIBILE SU Google Play



ISSN 1827-1383
9 771827 138009

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it